

CONTROLO GEOMÉTRICO DE TABULEIROS DE PONTES CONSTRUÍDAS TRAMO A TRAMO COM ADUELAS

(Médio e Grande Vão)

PEDRO MIGUEL RIBEIRO DE SOUSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Pedro Álvares Ribeiro do Carmo
Pacheco

Coorientador: Engenheiro André Filipe de Bastos Resende

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar aqui uma palavra de agradecimento a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho, em particular:

Ao Professor Doutor Pedro Pacheco, meu orientador científico, por todas as críticas, sugestões, conselhos, conhecimentos transmitidos e incentivos que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao Engenheiro André Resende, meu coorientador, pelo apoio prestado, críticas, sugestões e toda a sua paciência e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas que foram surgindo ao longo do trabalho.

Ao Engenheiro Alberto Torres, pela sua disponibilidade e prestabilidade sempre que solicitada a sua colaboração, assim como todas as críticas, sugestões e conselhos ao trabalho realizado.

Aos meus pais, por todo o amor, carinho, apoio e valores com que sempre me presentearam ao longo de toda a minha existência e que me tornaram na pessoa que sou hoje.

À Diana, por todo o carinho, amor, apoio e ajuda, bem como toda a paciência e compreensão face à menor disponibilidade da minha parte durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam ao longo destes anos.

RESUMO

Esta dissertação incide no estudo do controlo geométrico de tabuleiros de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas, mais precisamente na construção tramo a tramo com recurso a lançadeiras equipadas com o sistema OPS (pré-esforço orgânico).

Inicialmente apresentam-se os vários métodos de execução de tabuleiros com aduelas pré-fabricadas, bem como as respetivas características, os procedimentos construtivos e as vantagens e desvantagens de cada processo.

Em relação às particularidades construtivas deste tipo de pontes são descritos os dois métodos mais utilizados para a pré-fabricação das aduelas e são abordados os aspetos de manuseamento e armazenamento das aduelas. São também tratadas questões referentes a juntas entre aduelas e ao sistema de pré-esforço longitudinal. São ainda apresentados, de uma forma muito resumida, os principais métodos de análise longitudinal sendo superficialmente abordado o comportamento sísmico deste tipo de pontes.

No contexto da construção tramo a tramo de obras de médio e grande vão, são apresentadas duas lançadeiras equipadas com o sistema OPS e caracterizadas as suas operações no decurso da construção do tabuleiro. Os principais desvios geométricos que poderão ocorrer nas diferentes fases construtivas são identificados e caracterizados.

De modo a prevenir e corrigir os desvios geométricos identificados é necessário um rigoroso controlo geométrico nas diferentes fases construtivas. Assim, descreve-se o processo de controlo geométrico durante a pré-fabricação das aduelas e enunciam-se algumas medidas corretivas a aplicar na fase de montagem das aduelas de modo a alcançar o alinhamento desejado. Em particular, durante a fase de montagem das aduelas, a deformação da lançadeira causa um desvio da posição altimétrica do tabuleiro. Assim, apresenta-se um estudo com a simulação do processo construtivo com as lançadeiras apresentadas de modo a prever o desvio no final do processo construtivo. Neste contexto, são introduzidas medidas para compensar a deformação da lançadeira ao longo do processo construtivo. Assim, é demonstrada a eficiência do pré-carregamento parcial da lançadeira e do sistema OPS para a compensação da deformação da lançadeira, de modo a diminuir o desvio de posição altimétrica do tabuleiro.

São também referidos métodos/procedimentos para controlar outros desvios geométricos associados ao tipo de construção apresentado.

PALAVRAS-CHAVE: Aduelas pré-fabricadas, construção tramo a tramo, controlo geométrico, OPS (pré-esforço orgânico), lançadeira

ABSTRACT

This dissertation focuses in the study of the geometric control of the pre-cast segmental bridges, more precisely about the span by span construction using the launching gantries equipped with the OPS system (organic prestressing system).

The first chapter presents several methods of pre-cast segmental bridges, as well as their characteristics, the construction procedures and the advantages and disadvantages of each process are also presented.

Regarding de specific traits of the construction of such bridges, the two most common methods used in prefabrication of the segments are decribed as well as the aspects of the handling and storage of thereof. Issues related with the segmental joints and the longitudinal prestressing system are addressed. Additionally, the main methods of longitudinal analysis are synthetically referred, as well as the seismic behavior of such bridges.

In the context of span by span construction of medium and large span, two launching gantries equipped with the OPS system are characterized and its operation throughout the construction of the deck is explained. The main geometric deviations that may occur at the different phases of the construction are identified and characterized.

In order to prevent and correct the identified geometric deviation it is mandatory a straight geometry control in the several construction phases. So, the geometry control during the prefabrication of the segments are listed and some corrective measures to be applied during the segments assembly in order to achieve the desired alignment are drawn. Particularly, during the segments assembly, the launching gantry deformation causes a deviation of the deck's position. Therefore a simulation study of the constructive process with the presented launching gantries is presented in order to previse the deviation in the end of the constructive process. In this context, the compensation measures to avoid the launching gantries deformations along the constructive process are introduced. This way, the partial pre loading of the launching gantries efficiency is comproved as well as the effectiveness of the OPS system in the compensation of launching gantry deformation, both useful to decrease the deviation of the deck.

Finally, the methods/procedures of geometric deviation control in this specific type of construction are summarized.

KEYWORDS: Precast segments, span by span construction, geometry control, OPS (organic prestressing system), launching gantries

ÍNDICE GERAL

| | |
|-----------------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | V |

| | |
|----------------------------|---|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. ASPETOS GERAIS | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 1 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO | 2 |

| | |
|--|----|
| 2. ESTADO DA ARTE DA CONSTRUÇÃO DE PONTES DE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS | 3 |
| 2.1. INTRODUÇÃO | 3 |
| 2.2. CONSTRUÇÃO POR ADUELAS PRÉ-FABRICADAS TRAMO A TRAMO | 4 |
| 2.2.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO | 4 |
| 2.2.2. CONSTRUÇÃO COM LANÇADEIRA SUPERIOR OU LANÇADEIRA INFERIOR | 4 |
| 2.2.2.1. Lançadeira superior | 4 |
| 2.2.2.2. Lançadeira inferior | 5 |
| 2.2.2.3. Vantagens e desvantagens | 6 |
| 2.2.3. CIMBRE | 6 |
| 2.2.3.1. Processo construtivo | 7 |
| 2.2.3.2. Vantagens e desvantagens | 7 |
| 2.3. CONSTRUÇÃO POR AVANÇOS SUCESSIVOS COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS | 8 |
| 2.3.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO | 8 |
| 2.3.2. LANÇADEIRA DE ADUELAS | 8 |
| 2.3.2.1. Processo Construtivo | 9 |
| 2.3.2.2. Vantagens e desvantagens | 10 |
| 2.3.3. ELEVAÇÃO POR GRUA | 10 |
| 2.3.3.1. Processo construtivo | 10 |
| 2.3.3.2. Vantagens e desvantagens | 11 |
| 2.3.4. ELEVAÇÃO COM RECURSO A GUINCHO | 11 |
| 2.3.4.1. PROCESSO CONSTRUTIVO | 11 |
| 2.3.4.2. Vantagens e desvantagens | 12 |
| 2.4. CONSTRUÇÃO COM RECURSO A TIRANTES | 13 |
| 2.4.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO | 13 |

| | |
|---|----|
| 2.4.2. TIRANTES PROVISÓRIOS | 13 |
| 2.4.2.1. Procedimentos construtivos | 13 |
| 2.4.2.2. Vantagens e desvantagens | 15 |
| 2.4.3. TIRANTES DEFINITIVOS | 15 |
| 2.4.3.1. Procedimentos construtivos | 15 |
| 2.4.3.2. Vantagens e desvantagens | 16 |

| | |
|---|-----------|
| 3. PARTICULARIDADES CONSTRUTIVAS | 17 |
| 3.1. PRÉ-FABRICAÇÃO DE ADUELAS | 17 |
| 3.1.1. ASPETOS GERAIS | 17 |
| 3.1.2. LINHA LONGA DE FABRICO | 18 |
| 3.1.3. LINHA CURTA DE FABRICO | 20 |
| 3.2. MANUSEAMENTO E ARMAZENAMENTO DAS ADUELAS | 23 |
| 3.2.1. MANUSEAMENTO DAS ADUELAS | 23 |
| 3.2.2. ARMAZENAMENTO | 24 |
| 3.3. JUNTAS ENTRE ADUELAS | 25 |
| 3.3.1. ASPETOS GERAIS | 25 |
| 3.3.2. JUNTAS ENTRE ADUELAS DE 1ª GERAÇÃO | 26 |
| 3.3.3. JUNTAS ENTRE ADUELAS DE 2ª GERAÇÃO | 26 |
| 3.3.3.1. Juntas com resina epoxi | 27 |
| 3.3.3.2. Juntas secas | 29 |
| 3.3.4. ASPETOS DE DIMENSIONAMENTO | 29 |
| 3.4. SISTEMA DE PRÉ-ESFORÇO LONGITUDINAL | 32 |
| 3.4.1. ASPETOS GERAIS | 32 |
| 3.4.2. PRÉ-ESFORÇO INTERIOR | 34 |
| 3.4.3. PRÉ-ESFORÇO EXTERIOR | 35 |
| 3.4.4. ASPETOS DE DIMENSIONAMENTO | 38 |
| 3.4.4.1. Pré-esforço interior | 38 |
| 3.4.4.2. Pré-esforço exterior | 38 |
| 3.5. ANÁLISE LONGITUDINAL | 39 |
| 3.5.1. ANÁLISE ELÁSTICA | 39 |
| 3.5.2. ANÁLISE PLÁSTICA | 39 |
| 3.5.3. ANALISE NÃO LINEAR COM MODELO DE ELEMENTOS FINITOS | 40 |
| 3.6. COMPORTAMENTO SÍSMICO | 41 |
| 3.6.1. ASPETOS GERAIS | 41 |
| 3.6.2. ASPETOS DE DIMENSIONAMENTO | 41 |

| | |
|---|----|
| 4. CONSTRUÇÃO TRAMO A TRAMO COM RECURSO A LANÇADEIRA REFORÇADA COM O SISTEMA OPS (MÉDIO-GRANDE VÃO) | 43 |
| 4.1. SISTEMA OPS | 43 |
| 4.1.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO | 43 |
| 4.1.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS | 44 |
| 4.2. PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS | 45 |
| 4.2.1. CONSTRUÇÃO DE MÉDIO VÃO | 45 |
| 4.2.1.1. Configuração da lançadeira | 45 |
| 4.2.1.2. Operação da lançadeira | 45 |
| 4.2.2. CONSTRUÇÃO DE GRANDE VÃO | 47 |
| 4.2.2.1. Configuração da lançadeira | 47 |
| 4.2.2.2. Operação da lançadeira | 48 |
| 4.2.3. INTERAÇÃO LANÇADEIRA – TABULEIRO DA PONTE | 49 |
| 4.3. MORFOLOGIA DOS PRINCIPAIS DESVIOS GEOMÉTRICOS NA CONSTRUÇÃO DO TABULEIRO | 50 |
| 4.3.1. TIPOLOGIA DE DESVIOS | 50 |
| 4.3.2. DESVIOS NOS PILARES | 50 |
| 4.3.3. DESVIOS NA ADUELA 0 | 51 |
| 4.3.4. DESVIOS NAS ADUELAS | 52 |
| 4.3.5. DESVIOS NO PROCESSO CONSTRUTIVO | 55 |
| 5. CONTROLO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS INERENTES AO MÉTODO CONSTRUTIVO | 59 |
| 5.1. PRÉ-FABRICAÇÃO DAS ADUELAS | 59 |
| 5.1.1. ASPETOS GERAIS | 59 |
| 5.1.2. CONTROLO GEOMÉTRICO DURANTE A FABRICAÇÃO DAS ADUELAS COM O MÉTODO DA LINHA CURTA DE FABRICO | 60 |
| 5.2. INSTALAÇÃO DAS ADUELAS | 63 |
| 5.3. POSICIONAMENTO DA ADUELA 0 | 64 |
| 5.4. COMPORTAMENTO DO EQUIPAMENTO CONSTRUTIVO | 65 |
| 5.4.1. SIMULAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO | 65 |
| 5.4.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO | 65 |
| 5.4.2.1. Modelos de cálculo | 67 |
| 5.4.2.2. Parâmetros do sistema OPS | 68 |
| 5.4.3. CONSTRUÇÃO DE MÉDIO VÃO COM A LANÇADEIRA LG50 | 69 |
| 5.4.3.1. Simulação do processo construtivo sem qualquer tipo de compensação do efeito da deformação da lançadeira | 69 |

| | |
|---|-----------|
| 5.4.3.2. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial..... | 70 |
| 5.4.3.3. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial e ao sistema OPS | 71 |
| 5.4.3.4. Correção da posição do tabuleiro no final do processo com recurso aos cilindros de ajuste | 72 |
| 5.4.3.5. Comparação dos resultados obtidos..... | 73 |
| 5.4.4. CONSTRUÇÃO DE GRANDE VÃO COM A LANÇADEIRA LG90 | 74 |
| 5.4.4.1. Simulação do processo construtivo sem qualquer tipo de compensação do efeito da deformação da lançadeira | 74 |
| 5.4.4.2. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial..... | 75 |
| 5.4.4.3. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial e ao sistema OPS | 75 |
| 5.4.4.4. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial, sistema OPS e ajuste da orientação das primeiras aduelas..... | 76 |
| 5.4.4.5. Comparação dos resultados obtidos..... | 78 |
| 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 79 |
| 6.1. CONCLUSÕES..... | 79 |
| 6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 80 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 81 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 2.1. – Construção tramo a tramo com recurso a lançadeira | 5 |
| Fig. 2.2. – Lançadeira Superior | 5 |
| Fig. 2.3. – Lançadeira inferior..... | 6 |
| Fig. 2.4. – Cimbres ao solo | 7 |
| Fig. 2.5. – Construção tramo a tramo com recurso a cimbres ao solo | 7 |
| Fig. 2.6. – Oleron Viaduct (França) – Primeira lançadeira de aduelas | 9 |
| Fig. 2.7. – Esquema do processo construtivo por avanços sucessivos com recurso a lançadeira | 9 |
| Fig. 2.8. – Colocação de aduelas com recurso a uma grua..... | 10 |
| Fig. 2.9. – Esquema do processo construtivo por avanços sucessivos com recurso a grua..... | 11 |
| Fig. 2.10. – Elevação de uma aduela com recurso a guincho, West Tsing Yi - Hong Kong | 12 |
| Fig. 2.11. – Esquema do processo construtivo por avanços sucessivos com recurso a guincho de elevação..... | 12 |
| Fig. 2.12. – Ponte atirantada..... | 13 |
| Fig. 2.13. – Construção com recurso a tirantes provisórios | 14 |
| Fig. 2.14. – Processo construtivo com recurso a tirantes provisórios | 14 |
| Fig. 2.15. – Processo construtivo com recurso a tirantes definitivos | 15 |
| Fig. 2.16. – Construção de tabuleiro com tirantes definitivos, Industrial Ring Road – Bangkok..... | 15 |
| Fig. 3.1. – Linha longa de fabrico | 18 |
| Fig. 3.2. – Pré-fabricação de aduelas em linha longa de fabrico..... | 19 |
| Fig. 3.3. – Processo alternativo de pré-fabricação em linha longa de fabrico..... | 19 |
| Fig. 3.4. – Remoção da aduela para armazenamento | 20 |
| Fig. 3.5. – Esquema de uma célula de pré-fabricação | 21 |
| Fig. 3.6. – Cofragem exterior (esquerda) e cofragem interior (direita)..... | 21 |
| Fig. 3.7. – Linha curta de fabrico | 22 |
| Fig. 3.8. – Processo de pré-fabricação em linha curta de fabrico..... | 23 |
| Fig. 3.9. – Mecanismo de elevação de uma aduela | 24 |
| Fig. 3.10. – Parque de armazenamento de aduelas..... | 24 |
| Fig. 3.11. – Sobreposição das aduelas..... | 25 |
| Fig. 3.12. – Chave de corte singular (esquerda) e chaves múltiplas (direita)..... | 26 |
| Fig. 3.13. – Aduela com chaves múltiplas | 27 |
| Fig. 3.14. – Aplicação de resina epoxi na face da aduela..... | 28 |
| Fig. 3.15. – Vedante numa junta seca | 29 |
| Fig. 3.16. – Representação das áreas A_{sm} e A_k | 30 |
| Fig. 3.17. – Representação da área A_T | 31 |
| Fig. 3.18. – Esquematização dos parâmetros da equação 3.3..... | 32 |
| Fig. 3.19. – Traçado dos cabos de pré-esforço exterior não aderente na construção tramo a tramo | 33 |
| Fig. 3.20. – Sistema de pré-esforço exterior..... | 33 |
| Fig. 3.21. – Aduela pré-fabricada com bainhas de pré-esforço interior | 33 |
| Fig. 3.22. – Traçado dos cabos de pré-esforço na construção por avanços sucessivos | 34 |
| Fig. 3.23. – Traçado dos cabos de pré-esforço de continuidade..... | 34 |
| Fig. 3.24. – Comparação das excentricidades com cabos interiores e cabos exteriores..... | 35 |
| Fig. 3.25. – Sistema de pré-esforço exterior..... | 35 |
| Fig. 3.26. – Aduela sobre pilar com dispositivo de ancoragem | 36 |
| Fig. 3.27. – Pormenor de ancoragens de cabos de pré-esforço exterior no diafragma..... | 36 |
| Fig. 3.28. – Aduela com desviadores de cabos de pré-esforço..... | 36 |
| Fig. 3.29. – Pormenor de desviadores de cabos de pré-esforço exterior | 37 |

| | |
|---|----|
| Fig. 3.30. – Variação da deformação do cabo de pré-esforço interior aderente | 38 |
| Fig. 3.31. – Variação da deformação do cabo de pré-esforço exterior não aderente | 39 |
| Fig. 3.32. – Formação de rótulas plásticas | 40 |
| Fig. 3.33. – Modelo de elementos finitos de um tramo | 40 |
| Fig. 4.1. – Elementos do sistema OPS numa viga de lançamento | 43 |
| Fig. 4.2. – Ancoragem ativa (esquerda); Ancoragem passiva (direita) | 44 |
| Fig. 4.3. – Deformação de um cimbria com e sem OPS | 44 |
| Fig. 4.4. – Configuração da LG50 | 45 |
| Fig. 4.5. – Avanço da lançadeira | 46 |
| Fig. 4.6. – Lançadeira em posição para colocação das aduelas | 46 |
| Fig. 4.7. – Pré-suspensão de 7 aduelas | 47 |
| Fig. 4.8. – Procedimento construtivo | 47 |
| Fig. 4.9. – Fase final do processo construtivo do vão | 47 |
| Fig. 4.10. – Configuração da LG90 | 48 |
| Fig. 4.11. – Avanço final da lançadeira | 48 |
| Fig. 4.12. – Pré-suspensão das 7 aduelas do vão e das 7 aduelas do vão seguinte | 49 |
| Fig. 4.13. – Fim do ciclo construtivo | 49 |
| Fig. 4.14. – Alteração do alinhamento vertical (alçado) do tabuleiro devido a desvio da cota do pilar | 50 |
| Fig. 4.15. – Alteração do alinhamento horizontal (planta) devido a desvio no alinhamento dos pilares | 50 |
| Fig. 4.16. – Alteração no alinhamento devido a desvio na geometria da aduela 0 | 51 |
| Fig. 4.17. – Alteração do alinhamento vertical (em alçado) devido ao desvio no posicionamento da aduela 0 | 52 |
| Fig. 4.18. – Alteração do alinhamento horizontal (em planta) devido ao desvio no posicionamento da aduela 0 | 52 |
| Fig. 4.19. – Plano médio de uma aduela em planta (esquerda) e alçado (direita) | 53 |
| Fig. 4.20. – Alteração do alinhamento horizontal (planta) devido a desvio na geometria da aduela | 53 |
| Fig. 4.21. – Alteração do alinhamento vertical (alçado) devido a desvio na geometria da aduela | 54 |
| Fig. 4.22. – Esquema do desvio sistemático | 54 |
| Fig. 4.23. – Admissão de uma nova aduela (n+1) na lançadeira | 55 |
| Fig. 4.24. – Ajuste da nova aduela (n+1) e encaixe na aduela (n) | 56 |
| Fig. 4.25. – Diferenças de temperatura numa aduela | 56 |
| Fig. 4.26. – Alteração da geometria do tabuleiro devido ao efeito da temperatura | 57 |
| Fig. 4.27. – Desvio do tabuleiro na construção de grande vão | 57 |
| Fig. 5.1. – Ajuste da aduela de contra molde para definição de uma curvatura vertical | 60 |
| Fig. 5.2. – Ajuste da aduela de contra molde para definição de uma curvatura horizontal | 60 |
| Fig. 5.3. – Posicionamento das aduelas para se obter a geometria desejada | 61 |
| Fig. 5.4. – Esquema do processo de controlo geométrico | 62 |
| Fig. 5.5. – Esquema do processo de controlo geométrico automatizado | 62 |
| Fig. 5.6. – Alteração da geometria das aduelas (n+1) e (n+2) para corrigir o erro criado pela aduela (n) | 63 |
| Fig. 5.7. – Ajuste com tacos de resina epoxi | 64 |
| Fig. 5.8. – Pontos para controlo de posicionamento da aduela 0 | 64 |
| Fig. 5.9. – Controlo do posicionamento da aduela 0 a partir de estações de controlo no solo | 65 |
| Fig. 5.10. – Procedimento de cálculo da posição das aduelas ao longo do processo construtivo | 66 |
| Fig. 5.11. – Modelo Robot da lançadeira LG50 carregada com as 3 primeiras aduelas | 67 |
| Fig. 5.12. – Modelo Robot da lançadeira LG90 carregada com as 2 primeiras aduelas | 67 |

| | |
|--|----|
| Fig. 5.13. – Pontos de controlo do sistema OPS na lançadeira LG90..... | 68 |
| Fig. 5.14. – Pontos de controlo do sistema OPS na lançadeira LG50..... | 68 |
| Fig. 5.15. – Colocação das duas primeiras aduelas..... | 69 |
| Fig. 5.16. – Posição das aduelas no final do processo construtivo..... | 70 |
| Fig. 5.17. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial..... | 71 |
| Fig. 5.18. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial e OPS . | 72 |
| Fig. 5.19. – Evolução da força do atuador OPS ao longo do processo construtivo | 72 |
| Fig. 5.20. – Sistema de ajuste geométrico do tabuleiro..... | 73 |
| Fig. 5.21. – Comparação dos resultados obtidos..... | 74 |
| Fig. 5.22. – Posição das aduelas no final do processo construtivo..... | 74 |
| Fig. 5.23. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial..... | 75 |
| Fig. 5.24. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial e OPS . | 76 |
| Fig. 5.25. – Evolução da força do atuador OPS ao longo do processo construtivo | 76 |
| Fig. 5.26. – Ajuste da orientação das primeiras aduelas | 77 |
| Fig. 5.27. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial, OPS e ajuste da orientação das primeiras aduelas..... | 77 |
| Fig. 5.28. – Comparação dos resultados obtidos..... | 78 |

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_k – Área mínima de todas as chaves no plano de rotura [m^2]

A_{sm} – Área entre chaves no plano de rotura [m^2]

A_T – Área efetiva de corte

A_{joint} – Área da junta comprimida [$\cong b_w \cdot h_w$]

b_n – Largura das chaves de corte

b_w – Largura da alma

def – deformação vertical

d1 – largura no topo da aduela

d2 – largura na base

f_{ck} – Valor característico de compressão do betão aos 28 dias [MPa]

h_{ne} – Altura das chaves de corte, com $h_{ne} \leq 6b_n$

h_w – Altura da alma

L1, L2 – largura nas extremidades da aduela

X – Distância da aduela (n) à aduela 0 [m]

Y – Distância da aduela (n) à aduela (n+1) [m]

Zn – Cota da aduela (n) após a admissão da aduela (n+1) [m]

Z_{n+1} – Cota da aduela (n+1) imediatamente após o seu posicionamento [m]

σ_n – Compressão média na zona da junta [MPa]

Θ_n^{n+1} – Rotação do tabuleiro devido à deformação da lançadeira causada pela aduela (n+1) [rad]

μ – Coeficiente de fricção (betão – betão)

OPS – Organic prestressing system

1

INTRODUÇÃO

1.1. ASPETOS GERAIS

A construção de tabuleiros de pontes ou viadutos com aduelas pré-fabricadas tem vindo a revelar-se muito atrativa, pelas vantagens decorrentes do método construtivo. Estas vantagens evidenciam-se sobretudo na vertente económica, no tempo de construção e na qualidade de execução.

A construção tramo-a-tramo é uma das técnicas utilizadas para este tipo de construção. Caracteriza-se, por exemplo, por ser uma boa solução na construção em zonas sensíveis, como áreas densamente urbanizadas, isto porque o processo construtivo decorre num período de tempo reduzido e pode ser mantido o tráfego na área de construção da ponte. No entanto, para que seja possível alcançar uma superestrutura final corretamente construída, é indispensável que se proceda a um complexo e rigoroso controlo geométrico quer na fase de pré-fabricação, quer na fase de montagem das aduelas. É essencial compreender, identificar e analisar todos os possíveis desvios quer eventuais, quer intrínsecos, que poderão ocorrer durante as várias fases construtivas e criar um conjunto de medidas corretivas de modo a que o alinhamento final da superestrutura seja o correto.

1.2. OBJETIVOS

Numa primeira fase do presente trabalho, pretende-se caracterizar o estado da arte da construção de pontes com aduelas pré-fabricadas.

Intenta-se elaborar uma descrição das particularidades construtivas e de dimensionamento da construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, designadamente sobre os métodos de pré-fabricação das aduelas, das juntas entre aduelas e do sistema de pré-esforço longitudinal.

Pretende-se também fazer a descrição dos procedimentos construtivos da construção tramo-a-tramo de médio e grande vão com recurso a duas lançadeiras equipadas com o sistema OPS.

Tenciona-se também identificar e caracterizar os desvios geométricos, eventuais ou intrínsecos, que poderão ocorrer nas diferentes fases construtivas, de modo a definir as medidas preventivas e corretivas a aplicar. Nesta perspetiva, é essencial compreender o processo de controlo geométrico a aplicar nas diferentes etapas construtivas.

Numa fase posterior do trabalho, pretende-se estimar o desvio da posição altimétrica associado à deformação da lançadeira ao longo do processo construtivo e incluir medidas para a correção deste desvio. Para isso, procura-se efetuar uma simulação do processo construtivo do tabuleiro, tendo em

conta a interação lançadeira-tabuleiro da ponte, de modo a introduzir as medidas corretivas e verificar a sua eficiência no controlo da deformação da lançadeira.

1.3. ORGANIZAÇÃO

A dissertação apresentada foi dividida em seis capítulos, sendo o presente capítulo dedicado à introdução.

No Capítulo 2 é apresentado o Estado da Arte da construção de pontes com aduelas pré-fabricadas. São apresentados os procedimentos construtivos específicos da construção tramo a tramo, por avanços sucessivos e com recurso a tirantes, bem como as principais características e as vantagens e desvantagens referentes a cada processo construtivo.

O Capítulo 3 descreve as particularidades construtivas da construção de pontes com aduelas pré-fabricadas. Apresentam-se os diferentes métodos de pré-fabricação das aduelas, os aspetos referentes ao armazenamento e transporte das aduelas, e o seu manuseamento durante estes processos. São também abordados os tipos de juntas entre aduelas, as diferentes soluções de pré-esforço longitudinal e as respetivas vantagens e desvantagens. Mencionam-se de forma muito sintética, os métodos de análise longitudinal e os aspetos referentes ao comportamento do tabuleiro à ação sísmica.

O Capítulo 4 apresenta os procedimentos construtivos da construção tramo a tramo com recurso a lançadeiras reforçadas com o sistema OPS. Revelam-se as lançadeiras para a construção de médio e grande vão e as respetivas operações ao longo do processo construtivo. Mencionam-se os aspetos relativos à interação da lançadeira-tabuleiro da ponte. São ainda identificados os principais desvios geométricos, que poderão ocorrer durante as diferentes fases construtivas e é feita a sua caracterização.

Ao longo do Capítulo 5, tendo por referência dois casos concretos, são apresentadas as medidas corretivas a aplicar durante a fase de pré-fabricação das aduelas, bem como as da fase de montagem das aduelas, sendo que na última é feita uma simulação dos processos construtivos de médio e grande vão. Na simulação do processo são incluídas as diferentes medidas corretivas do desvio devido à deformação da lançadeira ao longo do processo.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas algumas conclusões mais significativas sobre o trabalho desenvolvidas sugestões para desenvolvimentos futuros.

2

ESTADO DA ARTE DA CONSTRUÇÃO DE PONTES DE ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

2.1. INTRODUÇÃO

A construção de pontes e viadutos com tabuleiros executados com aduelas pré-fabricadas teve início em França no decorrer da década de 60. Desde então têm tido muitos desenvolvimentos no que diz respeito aos métodos construtivos, critérios de conceção e ao nível das soluções estruturais em que foi utilizada.

Nos dias de hoje esta tecnologia construtiva é utilizada com muita frequência sobretudo nos Estados Unidos da América e na Ásia. No continente europeu, esta tecnologia está pouco divulgada, com exceção de França e de Espanha.

A execução de pontes com aduelas pré-fabricadas caracteriza-se por ser um método de construção onde existe um elevado grau de rendimento, mecanização e menor quantidade de mão-de-obra necessária para a execução. Sendo assim, é possível executar superestruturas em menores períodos de tempo e com menores custos. A sua boa adaptabilidade a ambientes sensíveis, como zonas densamente urbanizadas, foi uma outra motivação para a grande adoção desta tecnologia. De salientar também a qualidade de execução, de materiais e de tolerâncias visto que a fabricação das aduelas é feita em fábrica ou em condições especiais no estaleiro.

Outra razão para o sucesso da construção com aduelas pré-fabricadas será os vários métodos construtivos disponíveis para a construção deste tipo de pontes. Os métodos construtivos utilizados neste tipo de construção são, a construção por avanços sucessivos com aduelas pré-fabricadas, a construção com recurso a tirantes provisórios ou definitivos e por fim a construção por aduelas pré-fabricadas tramo a tramo. O método construtivo mais adequado para uma determinada ponte depende do comprimento total da ponte, do comprimento dos vãos, da altura da ponte ao longo do seu comprimento, do acesso à área inferior à superestrutura e à disponibilidade de equipamento e mão de obra especializados (Wium, D. and Buyukozturk, O., 1984).

2.2. CONSTRUÇÃO POR ADUELAS PRÉ-FABRICADAS TRAMO A TRAMO

2.2.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO

A construção tramo a tramo tem sido posta em prática sobretudo na construção de pontes com vãos de 40 a 50 metros. Nos dias de hoje, com o desenvolvimento de novas tecnologias é possível construir pontes com vãos mais extensos.

Este método construtivo consiste na construção tramo a tramo através de um processo que utiliza uma lançadeira ou um cimbre ao solo. Durante o processo construtivo as aduelas de cada tramo são posicionadas e ficam temporariamente suspensas ou apoiadas numa lançadeira ou num cimbre ao solo. Posto isto é-lhes aplicado o pré-esforço longitudinal que assembla todas as aduelas do vão conferindo-lhes rigidez estrutural. Assim, já se poderá posicionar o tramo completo nos seus apoios definitivos. Relativamente ao sistema estrutural da superestrutura, este poderá ser simplesmente apoiado nos pilares ou poderá ser contínuo, o que implica recorrer a um sistema adicional de pré-esforço longitudinal.

O método construtivo tramo a tramo, quando associado a uma intensa pré-fabricação das aduelas, mostra-se uma solução muito eficaz para a construção em períodos de tempo reduzidos ou em zonas sensíveis como áreas densamente urbanizadas.

2.2.2. CONSTRUÇÃO COM LANÇADEIRA SUPERIOR OU LANÇADEIRA INFERIOR

Para ser possível a construção de pontes e viadutos através do método construtivo tramo a tramo, é necessário um sistema de construção que possibilite o posicionamento das aduelas no tramo. Este sistema de construção envolve o uso de uma lançadeira que poderá estar numa cota altimétrica superior ou inferior relativamente à superestrutura.

2.2.2.1. Lançadeira superior

No que diz respeito à utilização de uma lançadeira superior, esta fica posicionada sobre o vão a ser construído apoiando-se nos pilares ou no tabuleiro. A lançadeira está equipada com uma ponte rolante, que possibilita a admissão das aduelas, quer pelo tabuleiro já construído quer içando-as a partir de uma cota inferior. Possibilita também, posteriormente, o transporte das aduelas para a sua posição final, ficando estas suspensas por umas barras de suspensão que estão ligados à lançadeira. Quando estiverem colocadas todas as aduelas nas suas posições é feita a sua assemblagem com a aplicação do pré-esforço longitudinal, sendo agora possível pousar o tramo completo nos seus apoios definitivos. Após estes procedimentos a lançadeira fica operacional para se deslocar para o vão seguinte de modo a dar início à construção de um novo vão.

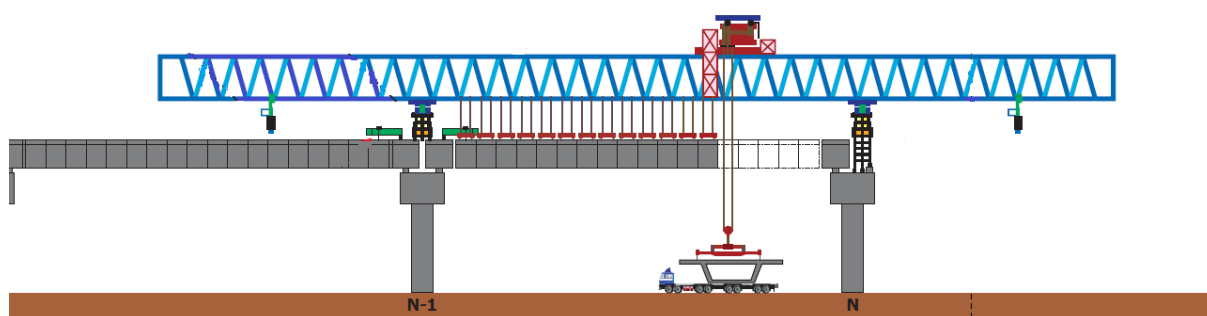


Fig. 2.1. – Construção tramo a tramo com recurso a lançadeira (Adaptado de VSL)



Fig. 2.2. – Lançadeira Superior (FIGG)

2.2.2.2. Lançadeira inferior

No caso de uma lançadeira inferior, o procedimento é basicamente o mesmo que numa lançadeira superior, mas agora esta encontra-se numa cota altimétrica inferior relativamente à superestrutura. Este sistema consiste em duas vigas autolanzáveis que se situam uma de cada lado do alinhamento do vão apoiando-se nos pilares adjacentes a este. O transporte das aduelas para a sua posição final é feito, geralmente, com recurso a gruas ou a guinchos de elevação que coloca as aduelas sobre a lançadeira.



Fig. 2.3. – Lançadeira inferior (FIGG)

2.2.2.3. Vantagens e desvantagens

A construção com lançadeira superior é um método construtivo muito automatizado e rápido. Assim, a quantidade de mão-de-obra necessária para a construção é reduzida. A receção das aduelas é flexível, sendo que, esta pode ser feita quer pela retaguarda, quer pela frente, ou então, a partir de uma cota inferior. Para além disto, ainda possibilita bons acessos às frentes de trabalho. No entanto, a utilização de lançadeira superior está limitada pela curvatura do vão, uma vez que a lançadeira é, geralmente, reta. Assim, não é possível a construção de vãos com curvatura muito reduzida. Contudo, já existem lançadeiras que possuem rótulas que possibilitam a construção em vãos de curvatura reduzida. Para além disto, estes equipamentos são pesados e complexos, o que leva a grandes custos na sua aquisição (Thorburn, N. and Meyer, M., 2006).

Na construção com lançadeira inferior as principais vantagens são a simplicidade do processo construtivo e do equipamento, a rapidez de construção, a reduzida quantidade de mão-de-obra e o facto de não se gerarem ações adicionais sobre o tabuleiro, decorrentes do processo construtivo. As principais desvantagens que podemos identificar são a limitação da utilização para vãos com curvatura reduzida (exceto para lançadeiras equipadas com rótulas) e a frequente necessidade de utilização de grua (Thorburn, N. and Meyer, M., 2006).

2.2.3. CIMBRE

Este método construtivo poderá ser conveniente no caso de projetos onde não se justifica o elevado investimento de capital numa lançadeira, em projetos com um número reduzido de vãos e a uma cota baixa. A solução poderá ser de cimbra ao solo, em que a colocação das aduelas sobre o cimbra é feita, geralmente, por gruas automóveis.



Fig. 2.4. – Cimbra ao solo (VSL)

2.2.3.1. Processo construtivo

O processo construtivo inicia-se com a instalação das aduelas a partir de uma das extremidades do tramo, sendo cada uma encaixada na aduela anterior e suportada pelo cimbra. De modo a assegurar que as aduelas ficam corretamente alinhadas durante a sua instalação, o cimbra é equipado com macacos hidráulicos e sistemas de rolamentos, o que permite o correto posicionamento das aduelas ficando assim todo o tramo com alinhamento desejado para se efetuar o puxo do pré-esforço longitudinal (Tarrataca, T.J.S., 2009).

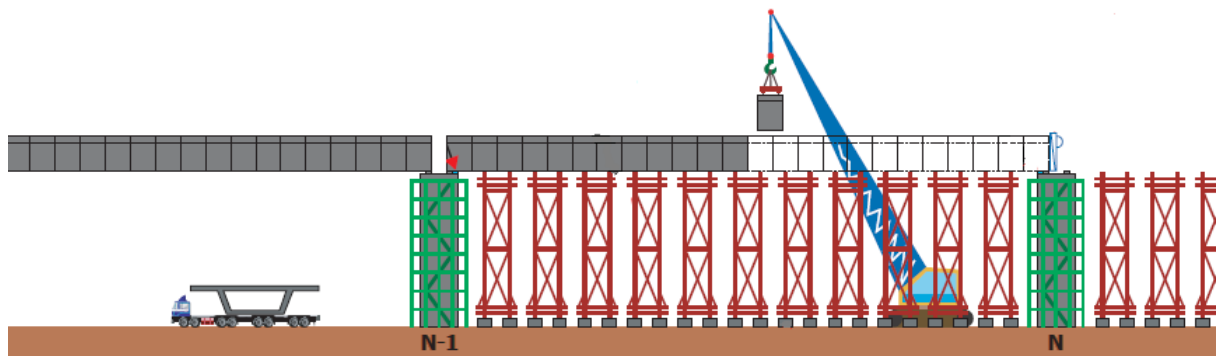


Fig. 2.5. – Construção tramo a tramo com recurso a cimbra ao solo (Adaptado de VSL)

2.2.3.2. Vantagens e desvantagens

A utilização deste método construtivo tramo a tramo é simples e de baixo capital de investimento. Os cimbres têm um custo de aquisição baixo, quando comparados com uma lançadeira, o que confere economia ao processo construtivo e a possibilidade de se operar em várias frentes.

No entanto, há limitações no que diz respeito à cota da superestrutura, uma vez que a capacidade das gruas utilizadas para a colocação das aduelas está limitada pelo peso das aduelas e só é economicamente viável até uma certa cota. Outras desvantagens deste método são a obstrução da área inferior à superestrutura, o que pode, por vezes, dificultar a passagem de veículos e materiais, e a exigência de um solo de boas condições para fazer face as solicitações transmitidas pelo cimbrio.

2.3. CONSTRUÇÃO POR AVANÇOS SUCESSIVOS COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

2.3.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO

A construção por avanços sucessivos é indicada para a construção de pontes com vãos tipicamente acima de 50 metros ou para superestruturas com uma geometria mais complexa, como por exemplo, tabuleiros com alinhamentos variáveis em planta e em perfil, curvaturas com raio mais pequeno, aduelas de geometria variável, etc.

Este processo construtivo poderá ser utilizado para construir pontes com um comprimento de vão até cerca de 130 metros (Fadón, S. and Herrero, J., 1995). A partir deste valor o grande peso das aduelas vai condicionar fortemente a versatilidade do processo construtivo. Segundo Hewson (2003), na construção por avanços sucessivos, é possível construir vãos na ordem dos 100 metros em 7 a 12 dias.

O processo construtivo inicia-se com a colocação da aduela 0 sobre o pilar, posto isto, procede-se à instalação sequencial de pares de aduelas simetricamente a partir da aduela 0. A montagem das aduelas durante a fase de avanço é assegurada por cabos de pré-esforço que vão sendo aplicados ao longo da colocação das aduelas. Este pré-esforço é dimensionado para suportar os tramos em consola (o seu peso próprio e as cargas variáveis construtivas). No final do processo construtivo, os tramos em consola são ligados, a meio vão, através da betonagem de uma aduela de fecho e com a aplicação do sistema de pré-esforço longitudinal adicional, garantindo-se assim a continuidade das consolas.

Para se proceder à construção do tabuleiro, é necessário recorrer a dispositivos que permitam a elevação e montagem das aduelas na sua posição final. Para isto, existem três soluções construtivas: o recurso a lançadeira de aduelas, a grua e guinchos de elevação.

2.3.2. LANÇADEIRA DE ADUELAS

Com este processo construtivo, o lançamento das aduelas em consola a partir do pilar, é feito com recurso a uma lançadeira. As aduelas podem ser recebidas pela lançadeira a partir do tabuleiro já construído, com recurso a um sistema de rolamentos que permite o transporte das aduelas para a posição desejada, ou através da elevação destas de um nível inferior com recurso a um guincho. O facto de se poder receber as aduelas através do tabuleiro já construído pode ser muito útil no caso de uma construção de uma ponte ou viaduto sobre terrenos de má qualidade, de difícil acesso ou a cota muito elevada. Nestes casos, seria difícil a admissão das aduelas ao nível do terreno.



Fig. 2.6. – Oleron Viaduct (França) – Primeira lançadeira de aduelas (Combault, J., 2004)

As lançadeiras de aduelas têm a capacidade de operar numa variada extensão de vãos e com pequenos raios de curvatura. Normalmente, a construção por avanços sucessivos com recurso a lançadeira de aduelas, é utilizada para a construção de vãos entre os 60 e 110 metros. Embora seja a solução mais complexa, o recurso a lançadeira torna o processo construtivo mais rápido. Com o equipamento e planeamento adequado, é possível atingir uma montagem de 16 aduelas por dia (Sauvageot, G., 2000).

2.3.2.1. Processo Construtivo

Estando a lançadeira na posição normal de colocação das aduelas, inicia-se o lançamento das aduelas. Cada aduela é posicionada a uma pequena distância da frente de cada consola de modo a ser possível a aplicação da resina epóxi nas faces das juntas. Posto isto, procede-se a assemblagem da nova aduela na consola e aplica-se o pré-esforço necessário. Após concluída a construção das consolas, procede-se a betonagem da junta de fecho e instala-se o sistema de pré-esforço de continuidade que vai fazer com que o tabuleiro adquira rigidez estrutural (Combault, J., 2004, Hewson, N.R., 2003).

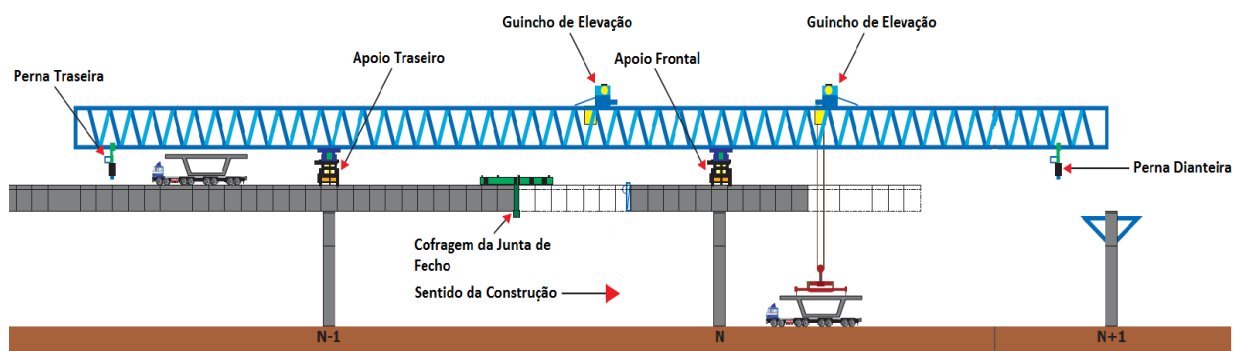


Fig. 2.7. – Esquema do processo construtivo por avanços sucessivos com recurso a lançadeira (Adaptado de VSL)

2.3.2.2. Vantagens e desvantagens

A construção por avanços sucessivos com recurso a lançadeira de aduelas permite uma boa adaptabilidade a alinhamentos com curvaturas reduzidas, tanto horizontais como verticais, e inclinações exigentes. Tudo isto faz deste método uma solução com grande flexibilidade. De salientar também, a elevada velocidade de construção (normalmente 4 a 6 aduelas por dia) e a possibilidade de se construir sobre terrenos difíceis e áreas sensíveis sem a necessidade de trabalhos significativos ao nível do solo, visto que, é possível a admissão das aduelas pelo tabuleiro já construído.

Por outro lado, as lançadeiras são um equipamento complexo que carecem de uma mão-de-obra experiente e qualificada de modo a manobrar de forma segura e eficiente. Para além disto, é necessário fazer um investimento de capital elevado para a aquisição da lançadeira, no entanto, esse investimento inicial na aquisição, pode ser recuperado se a lançadeira for dimensionada de modo a ser utilizada em mais do que um projeto (Sauvageot, G., 2000, Thorburn, N. and Meyer, M., 2006).

2.3.3. ELEVÇÃO POR GRUA

2.3.3.1. Processo construtivo

Nesta solução construtiva recorre-se a uma grua para elevar cada aduela diretamente para a frente da consola em construção. O processo construtivo segue as linhas gerais da construção com recurso a lançadeira, mas neste caso em vez da utilização da lançadeira para a colocação das aduelas, recorre-se a uma grua.



Fig. 2.8. – Colocação de aduelas com recurso a uma grua
Shatin T3 - Hong Kong (VSL)

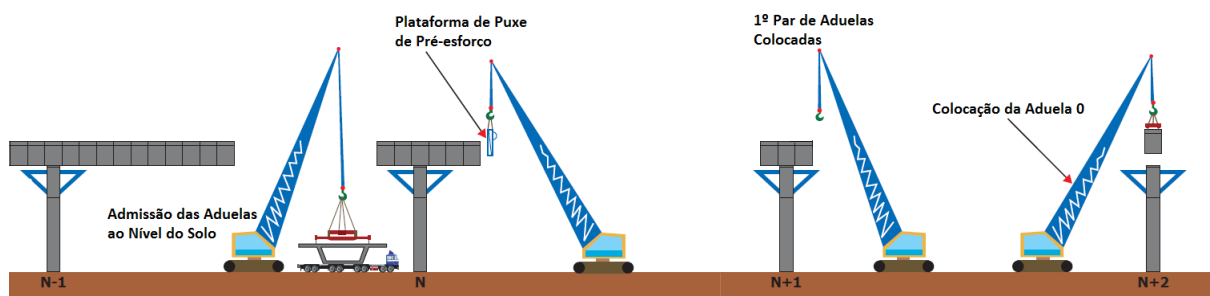


Fig. 2.9. – Esquema do processo construtivo por avanços sucessivos com recurso a grua (Adaptado de VSL)

2.3.3.2. Vantagens e desvantagens

O recurso a grua possibilita operar em várias frentes de trabalho e não exclusivamente na colocação das aduelas. Estas podem ser utilizadas para executar outros trabalhos necessários na obra.

No entanto, esta solução tem algumas condicionantes. As gruas utilizadas para este procedimento são de elevada capacidade, logo, são muito caras e a disponibilidade no mercado pode ser pequena. Para além disto, uso da grua está condicionado pela sua capacidade de elevação e alcance, ou seja, está condicionada pelo peso e dimensão das aduelas e pela cota da superestrutura. A utilização da grua requer umas boas condições locais e de acessibilidade caso contrário poderá não ser possível o recurso à grua para a construção do tabuleiro (Hewson, N.R., 2003, Thorburn, N. and Meyer, M., 2006).

2.3.4. ELEVAÇÃO COM RECURSO A GUINCHO

2.3.4.1. PROCESSO CONSTRUTIVO

Solução construtiva que utiliza um guincho de elevação que é suportado por um carro de avanço que por sua vez está ancorado sobre a extremidade do tabuleiro em consola já construída. O processo construtivo inicia-se com a colocação da aduela 0 e do primeiro par de aduelas. Posto isto, o dispositivo de elevação (carro de avanço e guincho) é posicionado sobre as aduelas. A colocação primeiras aduelas e do dispositivo de elevação são feitas com recurso a uma grua. Ao longo do processo construtivo, o dispositivo de elevação das aduelas vai sendo deslocado para a extremidade da consola já construída para se proceder a elevação de uma nova aduela. Os restantes aspetos do processo construtivo são semelhantes ao apresentado em 2.3.2.1.



Fig. 2.10. – Elevação de uma aduela com recurso a guincho, West Tsing Yi - Hong Kong (VSL)

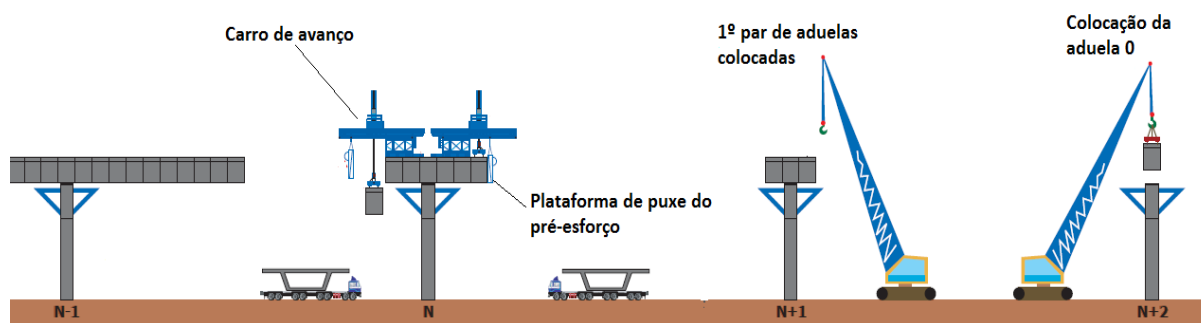


Fig. 2.11. – Esquema do processo construtivo por avanços sucessivos com recurso a guincho de elevação (Adaptado de VSL)

2.3.4.2. Vantagens e desvantagens

Este processo construtivo tem como vantagens a simplicidade de operação, o reduzido peso do equipamento e o facto de ser um processo económico.

No entanto, para ser possível a construção é necessário que haja boas condições de acesso à parte inferior da consola em construção para se proceder à admissão das aduelas. É necessário recolocar o dispositivo de elevação de pilar em pilar para que se possa dar início a um novo ciclo construtivo. Tanto a recolocação do dispositivo de elevação como a instalação da aduela 0, necessita de equipamentos auxiliares (grua). O funcionamento do mecanismo de elevação na extremidade da consola vai criar uma carga adicional temporária precisamente no local onde produz efeitos mais prejudiciais. (Hewson, N.R., 2003, Thorburn, N. and Meyer, M., 2006).

2.4. CONSTRUÇÃO COM RECURSO A TIRANTES

2.4.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO

A utilização de tirantes em pontes de aduelas pré-fabricadas pode ser feita de duas formas. Na primeira o recurso a tirantes será feita exclusivamente durante a fase construtiva do tabuleiro, ou seja, recorre-se a tirantes provisórios. Na segunda, os tirantes serão utilizados tanto na fase construtiva como durante a vida útil da ponte, ou seja, há o recurso a tirantes definitivos.

Com recurso a tirantes provisórios, as aduelas são temporariamente pré-esforçadas na sua posição final através de um sistema de cabos de suspensão (tirantes) e uma torre. Este sistema suporta todas as aduelas na sua posição final até o vão estar completo. Nesta altura é aplicado o pré-esforço longitudinal definitivo.

A construção com recurso a tirantes definitivos, na construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, permite a concretização de grandes vãos e de tabuleiros de seção reduzida. É possível a construção de vãos com uma extensão superior a 400 metros. Segundo Veletzos (2007), o comprimento de vão económico, com este método, é até os 450 metros.



Fig. 2.12. – Ponte atirantada
(Trayner, D., 2007)

2.4.2. TIRANTES PROVISÓRIOS

2.4.2.1. Procedimentos construtivos

A construção de pontes de aduelas pré-fabricadas com recurso a tirantes provisórios consiste na instalação sequencial de aduelas pré-fabricadas, a partir de um encontro até ao próximo, sendo que a estabilidade do tabuleiro durante a construção é feita através de um sistema de cabos de suspensão e de uma torre. A construção do primeiro tramo é geralmente realizada com recurso a cimbra ao solo, mas também é possível recorrer a tirantes provisórios com a aplicação dos cabos na parte de trás do primeiro encontro. Concluída a colocação das aduelas de um tramo, procede-se a aplicação progressiva do pré-esforço longitudinal enquanto se inicia a colocação das primeiras aduelas do vão seguinte pelo método de avanços sucessivos em consola. Ao mesmo tempo que isto, os tirantes são removidos e a torre é transportada e colocada sobre o pilar seguinte.



Fig. 2.13. – Construção com recurso a tirantes provisórios
(Combault, J., 2004)

A admissão das aduelas é feita a partir do tabuleiro já construído, sendo estas colocadas na extremidade da consola com recurso a um dispositivo adequado para a colocação. Após a colocação da aduela na sua posição final, esta é fixada temporariamente com tirantes e assim o dispositivo de colocação das aduelas é deslocado para o novo ponto extremo da consola. Posto isto, o correspondente par de tirantes é colocado e tensionado de modo a equilibrar o peso da nova aduela (Barker, J.M., 1980, Combault, J., 2004).

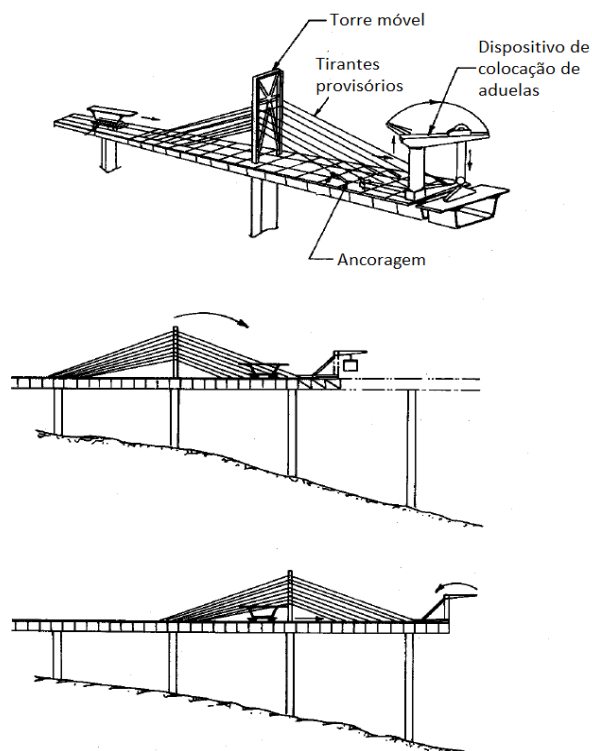


Fig. 2.14. – Processo construtivo com recurso a tirantes provisórios
(Adaptado de Barker, J.M., 1980)

2.4.2.2. Vantagens e desvantagens

Em comparação com o método dos avanços sucessivos, este método construtivo tem menores custos no que diz respeito ao sistema de pré-esforço. Recorrendo a este método, com a admissão das aduelas a ser feita pelo tabuleiro já construído, é possível construir em zonas sensíveis, com vários tipos de condicionantes, recorrendo a equipamentos simples e leves. (Combault, J., 2004).

2.4.3. TIRANTES DEFINITIVOS

2.4.3.1. Procedimentos construtivos

Neste método construtivo, a construção do tabuleiro inicia-se depois da construção da torre de suporte dos tirantes. As aduelas vão sendo colocadas, uma por uma por avanços sucessivos, em ambos os lados do pilar e suspensas pelos tirantes. Com isto, é possível a construção de tabuleiros com secções mais reduzidas o que possibilita uma redução dos materiais, peso e custo. (Veletzoz, M.J., 2007).

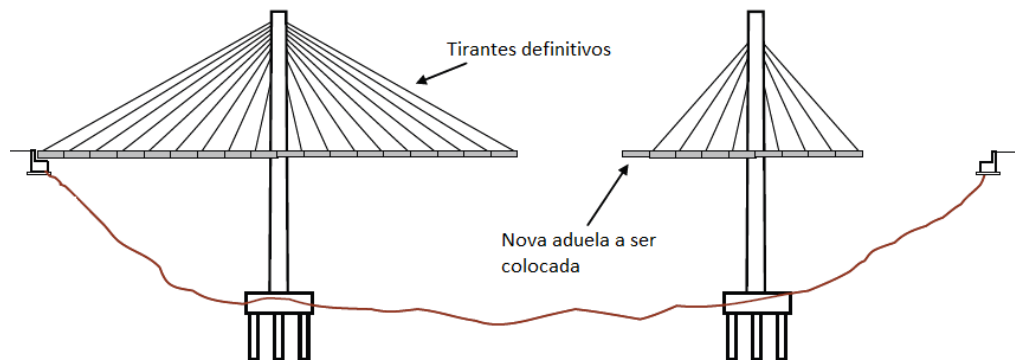


Fig. 2.15. – Processo construtivo com recurso a tirantes definitivos
(Adaptado de Veletzoz, M.J., 2007)



Fig. 2.16. – Construção de tabuleiro com tirantes definitivos, Industrial Ring Road – Bangkok
(Trayner, D., 2007)

2.4.3.2. Vantagens e desvantagens

Com este método construtivo é possível a construção de pontes com grandes vãos e com tabuleiros de secção reduzida.

3

PARTICULARIDADES CONSTRUTIVAS

3.1. PRÉ-FABRICAÇÃO DE ADUELAS

3.1.1. ASPETOS GERAIS

O processo de pré-fabricação de aduelas assenta no princípio de que um novo segmento é betonado contra o segmento anterior e assim obtém-se uma junta conjunta em que as faces se encaixam na perfeição. Assim, quando as aduelas são assembladas na sua posição final, estas terão a mesma posição relativa que tinham na fase de betonagem. A primeira ponte de aduelas pré-fabricadas a ser construída recorrendo a este processo de pré-fabricação foi a ponte Choisy-le-Roi em Paris, projetada por Jean Muller e foi concluída em 1964 (Sauvageot, G., 2000).

Sendo a pré-fabricação feita em fábrica ou em condições especiais em obra, é possível fazer-se um controlo de qualidade eficaz. Como exemplo, o facto de os efeitos das condições meteorológicas na produção das aduelas serem minimizados, uma vez que, estando num cenário semelhante à produção industrial, é possível assegurar boas condições no processo de fabricação.

Numa fase inicial da construção por aduelas pré-fabricadas, o estaleiro de pré-fabricação era parte integrante de todo o projeto, o que incluía os custos de instalação, operação e desmantelamento. O empreiteiro tinha de fazer uma escolha entre duas soluções possíveis: pré-fabricar as aduelas na obra ou construir uma fábrica de aduelas a uma determinadas distância.

Em alguns países, com o desenvolvimento deste método construtivo e com o envolvimento da indústria de pré-fabricação, é possível fazer uma adjudicação, de todas as questões operacionais, a uma entidade própria de pré-fabricação. Com este procedimento é possível melhorar a qualidade da construção, obter um processo mais fácil e viável, e ainda diminuir os custos (Palmer, A.M., 2006). No entanto, a fabricação de aduelas é muito específica e poderá ser difícil encontrar fábrica disponível para o processo.

Existem dois métodos de pré-fabricação. O método da linha longa de fabrico e o método da linha curta de fabrico. A escolha de qual método utilizar está dependente, sobretudo, da área disponível, as características geométricas das aduelas e, como os equipamentos exigem um considerável investimento, na tecnologia para a qual os empreiteiros já possuem os equipamentos necessários e experiência acumulada (Tarrataca, T.J.S., 2009).

3.1.2. LINHA LONGA DE FABRICO

Este método de pré-fabricação é normalmente adotado se o tabuleiro for reto ou então, com uma curvatura constante ao longo do seu comprimento. Recorrendo a uma plataforma de betonagem é possível reproduzir o alinhamento final (comprimento e perfil) do tabuleiro da ponte, tendo em conta as contraflechas que serão necessárias para compensar as deformações devido ao peso próprio, ao pré-esforço e à fluência e retração. O comprimento deste equipamento é geralmente igual a metade do comprimento do vão.



Fig. 3.1. – Linha longa de fabrico
(FIGG)

Nesta plataforma cada segmento é betonado numa posição fixa, enquanto uma máquina de betonagem, que inclui as cofragens interiores e exteriores, se movimenta longitudinalmente durante as sucessivas betonagens das aduelas. Cada aduela é betonada contra a aduela anterior, criando assim uma junta conjunta que se irá encaixar perfeitamente na construção do tabuleiro da ponte. Geralmente o sistema de cofragem só se movimenta, para a betonagem de uma nova aduela, quando o betão de cada aduela atingir uma resistência à compressão de aproximadamente 15MPa.

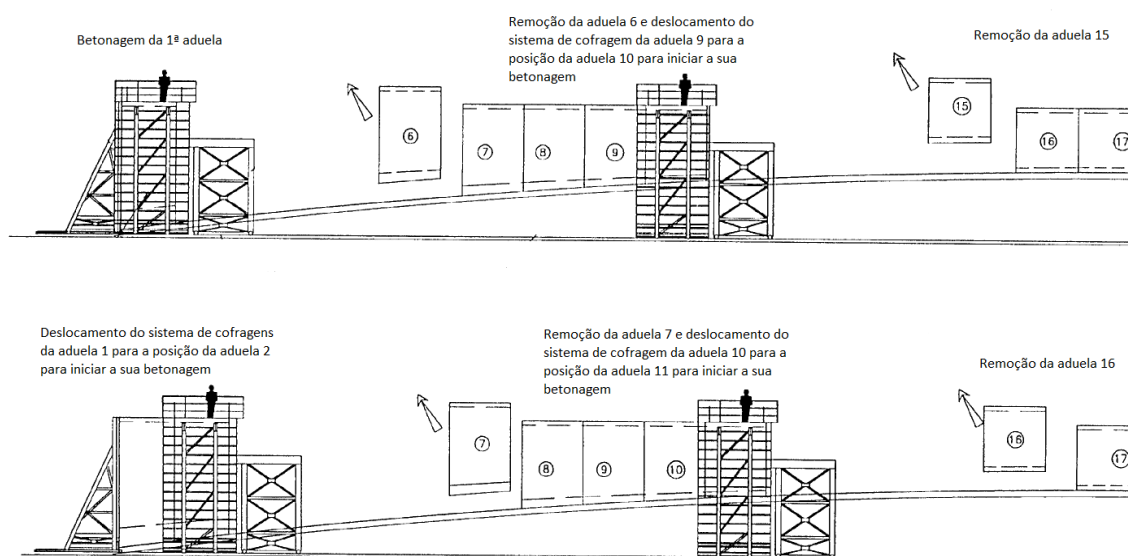


Fig. 3.2. – Pré-fabricação de aduelas em linha longa de fabrico
(Adaptado de VSL)

Em muitos casos, o comprimento da plataforma de betonagem tem o mesmo comprimento do vão a construir. Este processo é usado em conjunto com sistemas de cofragem simples em locais onde mão-de-obra é barata ou não qualificada. Neste processo a betonagem das aduelas é dividida em dois momentos. No momento da betonagem das aduelas ímpares e no momento da betonagem das aduelas pares.

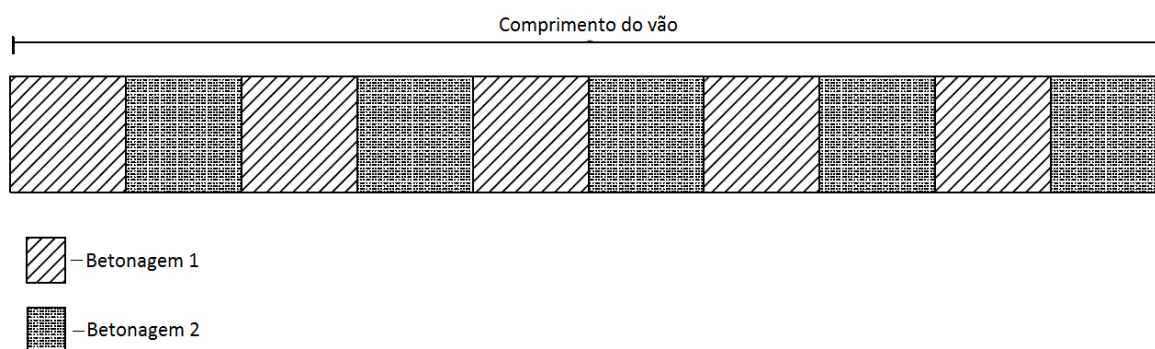


Fig. 3.3. – Processo alternativo de pré-fabricação em linha longa de fabrico

Durante a betonagem de cada segmento, a fundação da plataforma de betonagem poderá sofrer assentamentos devido ao peso da nova aduela. Estes assentamentos vão distorcer o alinhamento vertical do tabuleiro, daí que seja importante que as fundações da plataforma sejam muito rígidas, de modo a evitar tais assentamentos, fazendo com que estas distorções sejam mantidas dentro de limites toleráveis.

A remoção de uma aduela da plataforma de betonagem para armazenamento, onde continuará o processo de cura, só poderá ser feita, quando a resistência desta atingir um valor na ordem dos 20Mpa. O processo de remoção terá de ser feito com cuidado, para evitar danos nas chaves de corte das faces

das aduelas. No momento de remoção de uma aduela, a plataforma de betonagem irá subir, logo dois ou três segmentos devem ser mantidos na frente da construção de forma a evitar mais distorções.



Fig. 3.4. – Remoção da aduela para armazenamento (WIECON)

Embora o método de linha longa de fabrico seja um processo relativamente simples, para levar a cabo com sucesso, raramente é utilizado. A falta de espaço condiciona, na maior parte dos casos, o uso deste método. Uma plataforma de betonagem bem fundada poderá ter custos elevados e a taxa de betonagem não é alta. No entanto, não deverá ser descartada, e se for possível realizar uma boa fundação da plataforma de betonagem com custos reduzidos, oferece uma versão relativamente simples para pré-fabricar aduelas e dentro dos limites económicos aceites (Barker, J.M., 1980, Benaim, R., 2008, Hewson, N.R., 2003, Sauvageot, G., 2000).

3.1.3. LINHA CURTA DE FABRICO

O método de linha curta de fabrico é o mais utilizado para pontes de aduelas pré-fabricadas. É normalmente adotado para a execução de superestruturas com alinhamentos curvos em planta e em perfil. Neste método de pré-fabricação as aduelas são betonadas sobre células de pré-fabricação. As células mais utilizadas são as células horizontais onde as aduelas são fabricadas umas ao lado das outras (Ferraz, M.Â.C., 2001). Da constituição destas células fazem parte a cofragem exterior ajustável, a cofragem interior amovível e ajustável e um espaço livre onde se betona (Combault, J., 2004).

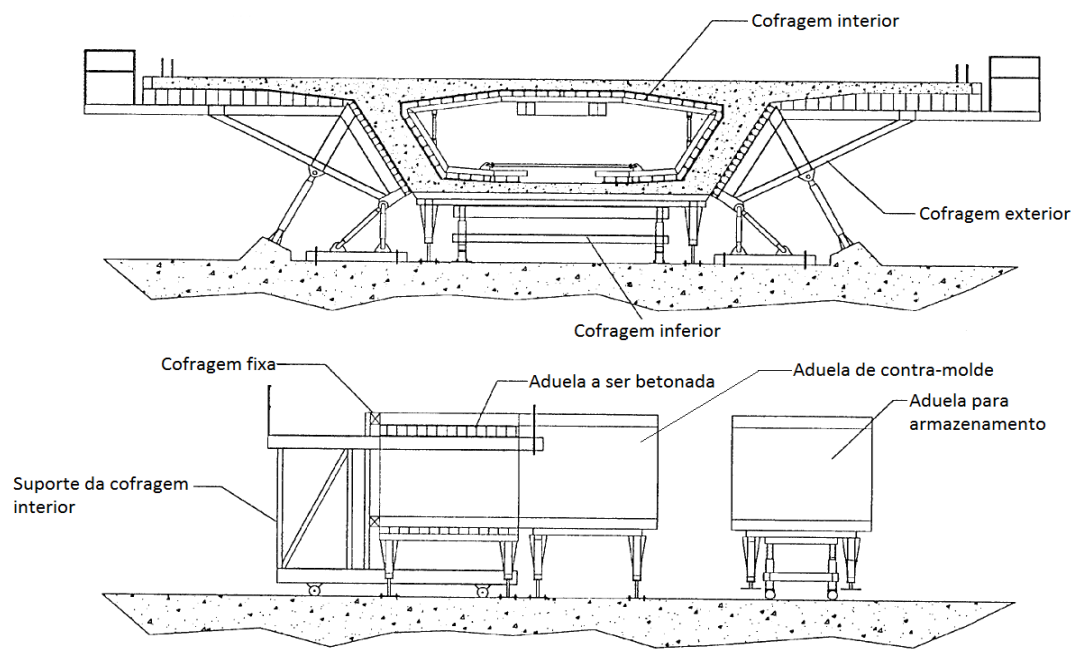


Fig. 3.5. – Esquema de uma célula de pré-fabricação
(Adaptado de VSL)



Fig. 3.6. – Cofragem exterior (esquerda) e cofragem interior (direita)
(WIECON)

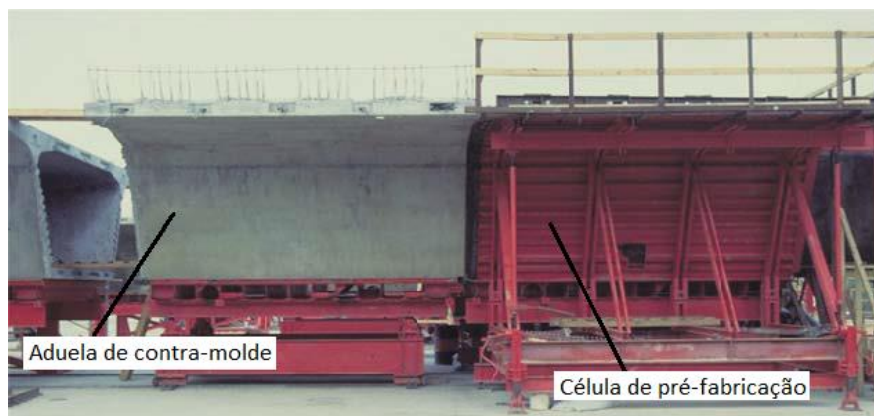


Fig. 3.7. – Linha curta de fabrico
(Adaptado de FIGG)

As aduelas são fabricadas individualmente num local fixo, entre moldes metálicos fixos (cofragem fixa), com as dimensões apropriadas, e a aduela betonada anteriormente, a chamada aduela de contramolde. A posição relativa de duas aduelas adjacentes é calculada em função do alinhamento final do tabuleiro. Esta posição relativa é depois reproduzida na célula de pré-fabricação ajustando a orientação da aduela contramolde. Enquanto a nova aduela é betonada, o peso e a pressão do betão fresco poderão causar um desvio no alinhamento da aduela de contramolde e os ângulos relativos entre as duas aduelas serão incorretos. A orientação relativa das duas aduelas é depois medida de modo a se calcular o erro obtido durante a betonagem da aduela. Posto isto, a aduela de contramolde é movida para o armazém e a aduela, recentemente betonada, é deslocada para a sua posição, tornando-se na nova aduela de contramolde e assim deixa livre o molde para a betonagem da próxima aduela. A plataforma de apoio da aduela que foi para armazém é colocada na zona de betonagem. A nova aduela, que agora serve de contramolde, é ajustada de acordo com a geometria pretendida e de modo a corrigir os erros da betonagem anterior (Benaim, R., 2008). Seguidamente, as armaduras e os dispositivos referentes ao pré-esforço são colocados na sua posição e as cofragens são ajustadas contra a cofragem fixa e a aduela de contramolde. Agora a nova aduela já pode ser betonada (Combault, J., 2004).

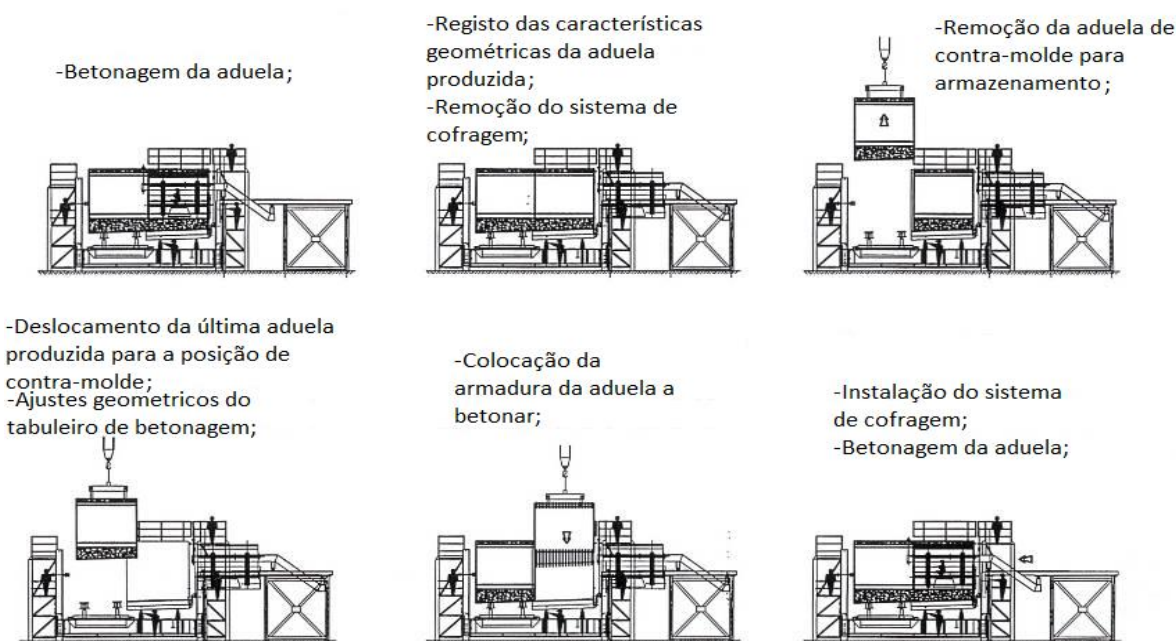


Fig. 3.8. – Processo de pré-fabricação em linha curta de fabrico
(Adaptado de Trayner, D., 2007)

Sendo uma operação rápida, é possível alcançar um ritmo de produção de uma aduela por dia por cada célula de pré-fabricação. Geralmente o ritmo de produção é ditado pelo tempo de cura do betão de cada aduela. A utilização de processos especiais, como por exemplo, a estufa ou a cura a vapor, reduzem o tempo de cura do betão, permitindo assim um aumento do ritmo de produção.

No que diz respeito ao betão a ser utilizada neste processo, este deve ter determinadas propriedades que lhe permitam preencher todos os espaços sem que seja necessária a sua vibração. Por isso, é normalmente utilizado um betão do tipo auto-compactável (Tarrataca, T.J.S., 2009).

3.2. MANUSEAMENTO E ARMAZENAMENTO DAS ADUELAS

3.2.1. MANUSEAMENTO DAS ADUELAS

No manuseamento das aduelas, uma das principais preocupações a ter em conta será a resistência do betão. As aduelas só deverão ser manuseadas após o betão atingir a resistência necessária, cerca de 20MPa. Um bom parâmetro indicador da resistência necessária para se fazer o manuseamento da aduela é a resistência à tração do betão. Esta deverá ser pelo menos igual à tensão de tração produzida pela flexão nas secções críticas devido ao peso próprio da aduela. De modo a ser evitada a ocorrência de fendilhação e deformação plástica, que poderiam pôr em causa o bom funcionamento das aduelas, é importante ter em conta esta questão da resistência do betão. Para além destes cuidados com o tempo de cura do betão, o manuseamento das aduelas deverá ser feito com muito cuidado de modo a evitar danos nas chaves de corte. (Tarrataca, T.J.S., 2009).

O facto do tempo de cura das aduelas aquando da sua primeira movimentação ser de poucos dias, é necessário que, tanto os pontos de elevação, como o mecanismo de elevação sejam dimensionados adequadamente. Assim, é recomendado que os pontos para aplicação do mecanismo de elevação sejam

colocados, de preferência, nos locais mais rígidos das aduelas, isto é, o mais próximo possível das almas (Hewson, N.R., 2003).



Fig. 3.9. – Mecanismo de elevação de uma aduela (FIGG)

3.2.2. ARMAZENAMENTO

O espaço para armazenamento das aduelas deve ser devidamente dimensionado de modo a se poder armazenar a quantidade necessária de aduelas. Um dos princípios a ter em conta neste dimensionamento é o facto de que a instalação das aduelas ser menos demorado que a sua fabricação, logo, é importante quantificar as aduelas armazenadas de modo a não atrasar a obra. A capacidade de armazenamento também deve ter em conta alguma eventual paragem na construção da ponte e assim ser necessário um maior número de aduelas armazenadas.



Fig. 3.10. – Parque de armazenamento de aduelas (FIGG)

A zona de armazenamento das aduelas deve ser cuidadosamente dimensionada e preparada de modo a que as aduelas sejam colocadas em suportes estáveis que impeçam distorções ou danos nos elementos das faces das aduelas. Estes cuidados são ainda mais importantes quando é necessário recorrer à sobreposição de duas ou três aduelas, devido ao reduzido espaço disponível. Para se conseguir boas condições de armazenamento nestas situações seriam necessários trabalhos de consolidação do solo. No entanto, tais trabalhos são, na maior parte dos casos, muito caros. Assim, recorre-se à colocação das aduelas sobre três apoios, de preferência de madeira, dispostos de maneira a reduzir as deformações evitando tensões secundárias nas aduelas. Estes apoios devem estar permanentemente sobre controlo (Benaim, R., 2008, Combault, J., 2004).



Fig. 3.11. – Sobreposição das aduelas (VSL)

3.3. JUNTAS ENTRE ADUELAS

3.3.1. ASPETOS GERAIS

Um dos principais entraves à adoção em grande escala da construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, são as juntas entre aduelas. De facto, as juntas entre aduelas foram sempre um grande problema neste tipo de pontes.

Estas juntas são os “pontos fracos” do tabuleiro da ponte. O facto de ser uma zona de descontinuidade, sem armadura torna estes pontos mais frágeis, logo, o comportamento das juntas irá ditar a qualidade final e a segurança da superestrutura.

De modo a ser possível uma transmissão de esforços de corte, foram adicionados às superfícies das aduelas chaves de corte. Inicialmente, as chaves de primeira geração tinham chaves singulares de grandes dimensões, no entanto, foi provado que o facto de serem de grande dimensão não oferecia um aumento de resistência ao corte e assim surgiram as chaves de segunda geração com chaves múltiplas de dimensão mais reduzidas e em maior número.

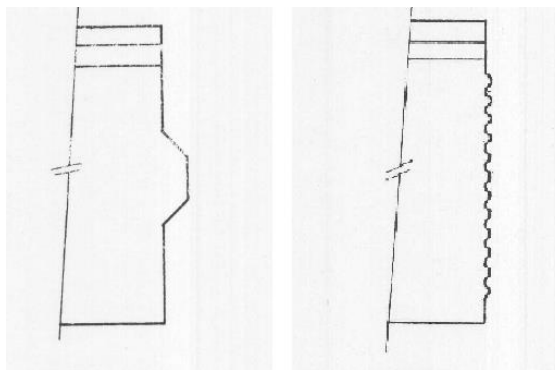


Fig. 3.12. – Chave de corte singular (esquerda) e chaves múltiplas (direita)
(Wium, D. and Buyukozturk, O., 1984)

As juntas podem ser preenchidas com resina epóxi ou então secas, ou seja, as faces das aduelas estão em contacto direto. O tipo de juntas a ser utilizado depende muito do método construtivo selecionado. Com o uso de chaves singulares a resina epóxi tinha uma função estrutural. Com o aparecimento das juntas de segunda geração a resina epóxi tem como objetivo melhorar o comportamento da junta em serviço e também a sua impermeabilização. Alguns regulamentos permitem a alteração destas juntas, adicionando ou retirando resina na junta, de modo a tentar corrigir alguns erros de alinhamento. No entanto, tal processo é desaconselhável, visto que a alteração das juntas na fase de instalação para resolver estes problemas geométricos, pode pôr em causa o bom funcionamento estrutural do tabuleiro.

As juntas entre aduelas ainda é um aspeto que necessita de mais investigação e desenvolvimento no que diz respeito à sua conceção e dimensionamento de modo a otimizar a construção de pontes com aduelas pré-fabricadas.

3.3.2. JUNTAS ENTRE ADUELAS DE 1ª GERAÇÃO

Inicialmente as juntas entre aduelas eram constituídas por chaves de corte singulares. Estas eram de grandes dimensões sendo que as do topo da aduela tinham uma função de ajuda na montagem das aduelas, já as das almas tinham como principal objetivo resistir e transferir esforços de corte enquanto a resina epoxi não tinha aderência/resistência suficiente.

Vários ensaios foram realizados onde se simulavam os esforços gerados nas chaves de corte, estando estas com ou sem reforço de armadura, enquanto a resina estava fresca. Todos os ensaios realizados mostraram que não era sensato confiar em chaves de corte singulares, isto porque, a sua capacidade resistente era apenas suficiente para suportar com segurança as forças de corte geradas pelo peso de uma aduela e mesmo aumentando a dimensão das chaves, estas não ofereciam nenhum acréscimo de resistência ao corte (Combault, J., 2004).

3.3.3. JUNTAS ENTRE ADUELAS DE 2ª GERAÇÃO

De forma a tentar resolver os problemas das juntas com chaves de corte singulares, desenvolveu-se um sistema onde foram adotadas chaves de corte múltiplas distribuídas pelas faces das aduelas, sobretudo nas almas. O objetivo das chaves de corte múltiplas é distribuir, o mais uniformemente possível, os esforços ao longo das almas. Para que isto seja possível, as chaves são em maior número mas com dimensões reduzidas. Ensaio realizados demonstraram que a resistência ao corte de juntas com

chaves de corte com tamanho reduzido está perto da resistência de almas sem qualquer junta (Combault, J., 2004).



Fig. 3.13. – Aduela com chaves múltiplas (VSL)

Com a adoção das chaves de corte múltiplas, a resina epoxi deixou de ter a função estrutural que tinha com as chaves de corte singulares. Assim, surgiu uma grande melhoria na segurança estrutural da superestrutura ao mesmo tempo que se tornou numa solução mais simples, uma vez que não é necessário o reforço das chaves de corte com armadura passiva (Benaim, R., 2008).

Devido ao facto de a resina epoxi ter deixado de ter uma função estrutural, surgiram dois tipos de juntas com chaves de corte múltiplas: juntas coladas com uma fina camada de resina epoxi e as juntas secas.

3.3.3.1. Juntas com resina epoxi

Como já referido, inicialmente com a utilização de juntas com chaves de corte singulares, a resina epoxi tinha uma função estrutural, resistir a esforços de corte entre as aduelas. Com a implementação das juntas de 2ª geração, esta função estrutural foi-lhe retirada. Nos dias de hoje já não se considera a resistência da resina em estado limite último, apenas na fase de serviço se pode apontar funções parciais de transmissão de esforços de compressão e corte. Para além da melhoria do comportamento da junta em serviço, a aplicação da resina permite também a impermeabilização da junta e durante a fase construtiva facilita a montagem das aduelas (Ferraz, M.Â.C., 2001).

A impermeabilização das juntas é importante na medida em que evita que a água penetre pela junta prevenindo o risco de corrosão dos cabos de pré-esforço. Por isto a impermeabilização é um fator decisor sobre a necessidade de se aplicar ou não resina epoxi, isto porque, se o tabuleiro for dimensionado com pré-esforço interior é necessário ter cuidados especiais no que diz respeito à impermeabilização, logo é exigida a aplicação de resina epoxi. Já no caso de um tabuleiro exclusivamente com pré-esforço exterior, não será necessária a aplicação de resina epoxi, salvo em casos onde por algum motivo em particular existe uma preocupação com a penetração de água nas juntas.

A aplicação da resina oferece uma vantagem adicional de lubrificação das superfícies de contacto das juntas facilitando a montagem e aumentando a precisão geométrica no encaixe visto que se reduz os efeitos das imperfeições nas superfícies (Benaïm, R., 2008).



Fig. 3.14. – Aplicação de resina epoxi na face da aduela
(Benaïm, R., 2008)

No entanto, a resina epoxi introduz um elemento de custo e risco para a estrutura. A integridade do tabuleiro depende da correta produção e aplicação da resina, isto porque pode levar a concentração de esforços e consequentemente a um mau comportamento da junta em serviço (Tarrataca, T.J.S., 2009).

A temperatura ambiente também é um aspeto a ter em conta. Quando a temperatura ambiente desce para algum valor crítico, a resina poderá endurecer causando dificuldades na sua colocação. Em alguns casos era aplicado calor de modo a melhorar o comportamento da resina quando sujeita a baixas temperaturas, no entanto, o elevado gradiente de temperatura causava fendas no betão danificando as faces das aduelas (Wium, D. and Buyukozturk, O., 1984). Atualmente há resinas específicas para serem utilizadas em vários patamares de temperatura.

De modo a criar um adequado contacto entre a resina e o betão e para expulsar a resina excedente, as duas superfícies da junta devem ser comprimidas durante o processo de endurecimento da resina. Isto poderá ser alcançado com a aplicação de um sistema de pré-esforço temporário que é geralmente concretizado por cabos ancorados no interior das aduelas ou dispositivos instalados na laje superior. O valor médio do esforço de compressão a aplicar deverá rondar os 0,25 MPa, sendo que o valor, em qualquer ponto da secção transversal, não deverá ser inferior a 0,15 MPa (Benaïm, R., 2008).

Antes de aplicar a resina devem retirar-se quaisquer resíduos ou água da superfície onde será aplicada a resina.

Todo este processo de aplicação da resina nas juntas trás custos adicionais e torna o processo construtivo mais demorado.

3.3.3.2. Juntas secas

Quando o tabuleiro é construído com um sistema de pré-esforço exterior já não é necessário a aplicação da resina epoxi, logo a solução é normalmente de junta seca entre aduelas. Esta solução tem vindo a ser muito utilizada na construção tramo a tramo onde geralmente todo o sistema de pré-esforço é externo.

Sem a necessidade de aplicação de resina epoxi o processo de construção do tabuleiro torna-se mais simples e mais rápido, pois poupa-se o tempo da aplicação da resina e do pré-esforço temporário.

No entanto, com a ausência da resina já não há lubrificação na junta durante a construção do tabuleiro, sendo assim é necessário que a assemblagem das aduelas seja feita com cuidados redobrados de modo a evitar danos. Para além disto, é necessário criar um tipo de vedante à prova de água na laje superior ao longo da junta de modo a prevenir a entrada de água da chuva. Poderá proceder-se à aplicação de resina epoxi numa pequena ranhura localizada na laje superior (Benaim, R., 2008, Hewson, N.R., 2003).

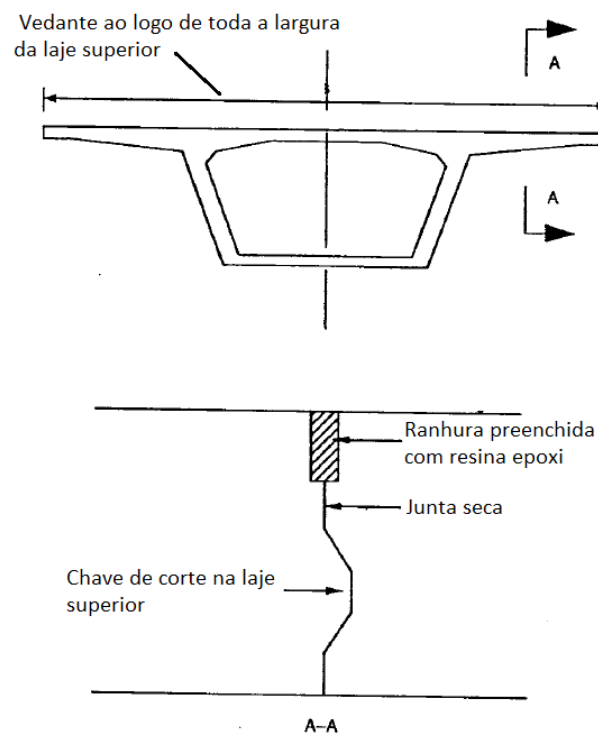


Fig. 3.15. – Vedante numa junta seca
(Adaptado de Hewson, N.R., 2003)

Este tipo de juntas só serão permitidas em conjugação com pré-esforço exterior em locais onde não ocorram ciclos gelo/degelo e onde não são usados produtos químicos anti-gelo.

3.3.4. ASPETOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento das juntas é um fator essencial para o bom funcionamento da superestrutura e até mesmo para a segurança de toda a estrutura.

A capacidade de resistência ao corte de uma junta com chaves de corte em betão é dada pela combinação da fricção entre as superfícies de contacto e a capacidade de corte das chaves (Rombach, G., 2002).

Nas pontes de aduelas pré-fabricadas, para além dos modos de rotura típicos das pontes de betão armado pré-esforçado (rotura por corte-flexão e rotura por corte), existe um outro modo de rotura que consiste na fissuração que ocorre nas chaves de corte e que se desenvolve paralelamente à junta. Este modo de rotura é frágil e súbito, uma vez que não existe nenhuma armadura ordinária que impeça a propagação das fendas.

Como referido anteriormente, a contribuição da resina epoxi na resistência ao corte em estado limite ultimo não deve ser considerado, logo dar-se-á apenas relevo aos modelos de dimensionamento indicados para juntas secas.

Um modelo de dimensionamento muito utilizado é o modelo da norma AASHTO. Segundo esta norma, o esforço de corte é transmitido através da junta por atrito e pela capacidade resistente das chaves (AASHTO, 1998, Rombach, G., 2004).

Norma AASHTO (1998):

$$V_j = A_k \cdot \sqrt{6,792 \cdot 10^{-3} \cdot f_{ck} \cdot (12 + 2,466 \cdot \sigma_n) + 0,6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n} \quad (3.1)$$

- Onde: σ_n ➤ Compressão média na zona da junta [MPa]
 A_{sm} ➤ Área entre chaves no plano de rotura [m²]
 f_{ck} ➤ Valor característico da compressão do betão aos 28 dias [MPa]
 A_k ➤ Área mínima de todas as chaves no plano de rotura [m²]

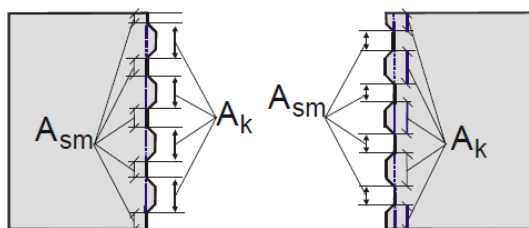


Fig. 3.16. – Representação das áreas A_{sm} e A_k (Rombach, G., 2002)

Em comparação, o modelo Alemão (DBV 1998) é mais conservador que o anterior, uma vez que não considera as chaves de corte na transmissão de esforços, apenas é considerado as forças de atrito, no entanto assume uma maior área de contacto (Rombach, G., 2004).

Recomendação do regulamento Alemão:

$$V_j = \mu \cdot A_T \cdot \sigma_n \quad (3.2)$$

- Onde: A_T ➤ Área efetiva de corte
 $\mu = 0.7$

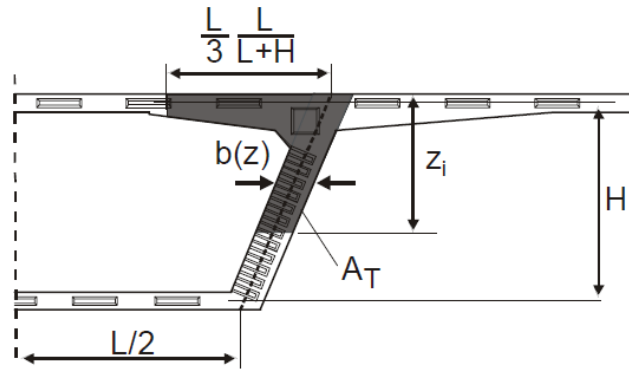


Fig. 3.17. – Representação da área A_T
(Adaptado de Rombach, G., 2002)

Baseado em algumas investigações, surgiu um novo modelo de dimensionamento. A resistência ao corte continua a ter em conta o atrito e a resistência das chaves. O modelo é similar ao da norma AASHTO, no entanto, no novo modelo passou a ser considerada toda a secção comprimida para a contabilização do atrito, enquanto na norma AASHTO apenas se considera as superfícies entre as chaves (Rombach, G., 2004).

$$V_j = \mu \cdot \sigma_n \cdot A_{\text{joint}} + 0,14 \cdot f_{ck} \cdot A_k \quad (3.3)$$

Onde: $\mu=0,65$ ➤ Coeficiente de fricção (betão – betão)

σ_n ➤ Compressão na zona da junta [MPa]

A_{joint} ➤ Área da junta comprimida [$\cong b_w \cdot h_w$]

b_w, h_w ➤ Largura/altura da alma

f_{ck} ➤ Valor característico de compressão do betão aos 28 dias [MPa]

A_k ➤ Área mínima de todas as chaves no plano de rotura [$\sum h_{ne} \cdot b_n$]

h_{ne} ➤ Altura das chaves de corte, com $h_{ne} \leq 6b_n$

b_n ➤ Largura das chaves de corte

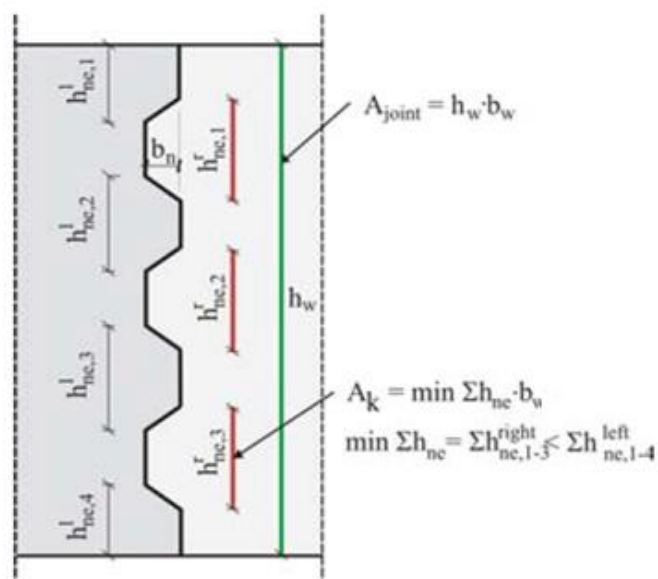


Fig. 3.18. – Esquematisação dos parâmetros da equação 3.3
(Rombach, G., 2004)

Devido ao modo de rotura frágil característico das juntas não reforçadas, deverá ser utilizado um fator redutor de 0,5. A norma AASHTO recomenda um fator de 0,75 para juntas secas e cabos de pré-esforço não aderentes (Rombach, G., 2004).

3.4. SISTEMA DE PRÉ-ESFORÇO LONGITUDINAL

3.4.1. ASPETOS GERAIS

Nas pontes de aduelas pré-fabricadas, o sistema de pré-esforço longitudinal desempenha um papel fundamental uma vez que confere rigidez estrutural à superestrutura, quer durante a fase construtiva, quer durante a vida útil da ponte. Na construção deste tipo de pontes, são correntemente utilizados dois tipos de pré-esforço: pré-esforço interno aderente e pré-esforço externo não aderente.

No passado, tanto o pré-esforço interno como o pré-esforço externo tinham problemas de dimensionamento, construção e durabilidade. Estes problemas foram sendo documentados levando a práticas atuais de detalhe e construção que estabeleceram uma base sobre qual o sistema a ser utilizado com sucesso na construção de pontes com aduelas pré-fabricadas (Hewson, N.R., 2003).

O sistema de pré-esforço exterior não aderente é correntemente utilizado na construção tramo a tramo. Neste sistema de pré-esforço, os cabos são exteriores à secção de betão, o que não quer dizer que sejam visíveis pelo exterior da ponte. Estes são ligados à superestrutura através de ancoragens nas aduelas sobre os pilares e por desviadores em aduelas ao longo do tabuleiro.

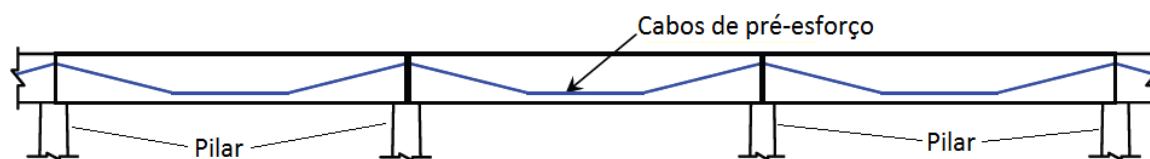


Fig. 3.19. – Traçado dos cabos de pré-esforço exterior não aderente na construção tramo a tramo (Adaptado de Veletz, M. J., 2007)

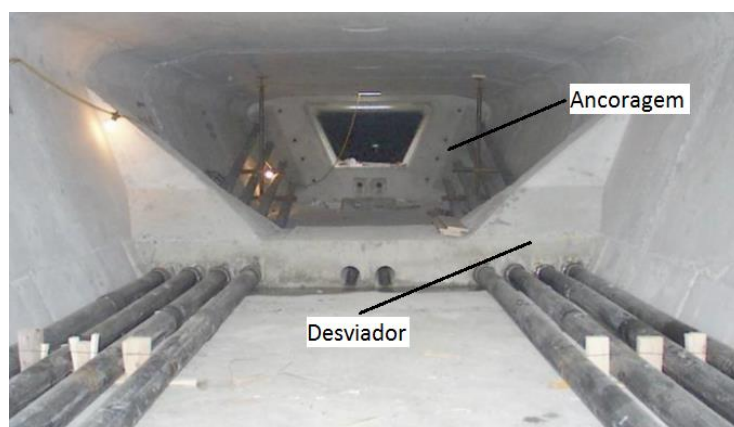


Fig. 3.20. – Sistema de pré-esforço exterior (Adaptado de FIGG)

O sistema de pré-esforço interior é sempre utilizado na construção por avanços sucessivos. Também na construção tramo a tramo este sistema poderá ser utilizado. Com este sistema os cabos são aplicados dentro de bainhas que se localizam dentro da secção de betão. Após o tensionamento dos cabos, as bainhas são injetadas com uma calda de cimento e assim é conferida aderência dos cabos à superestrutura, bem como a proteção dos cabos. Neste tipo de construção, por avanços sucessivos, é utilizado pré-esforço para resistir aos momentos negativos que surgem durante a fase construtiva e pré-esforço para dar continuidade estrutural.



Fig. 3.21. – Aduela pré-fabricada com bainhas de pré-esforço interior (Adaptado de FIGG)

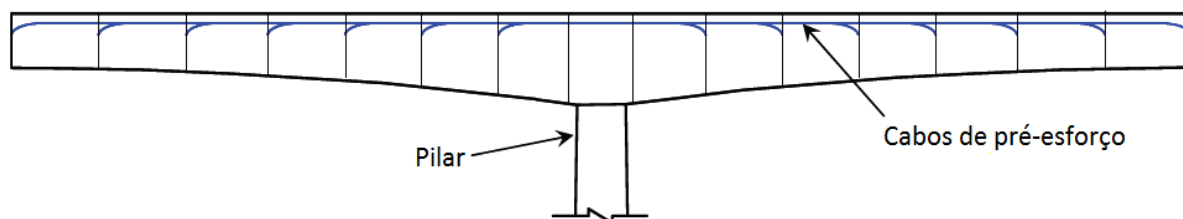


Fig. 3.22. – Traçado dos cabos de pré-esforço na construção por avanços sucessivos
(Adaptado de Veletzos, M. J., 2007)

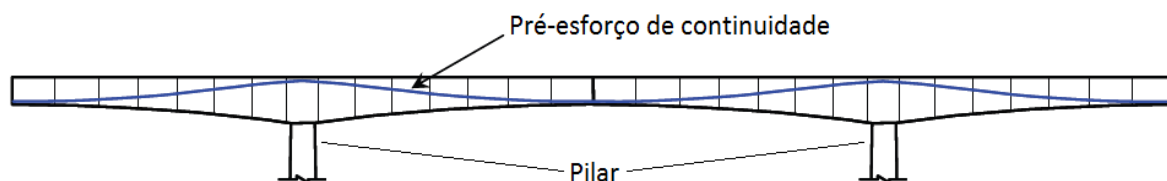


Fig. 3.23. – Traçado dos cabos de pré-esforço de continuidade
(Adaptado de Veletzos, M. J., 2007)

O sistema de pré-esforço a utilizar na construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, depende do método construtivo adotado. Tanto na utilização do sistema de pré-esforço interno como externo, a solução obtida poderá ser durável e eficiente. Em muitas pontes construídas recentemente, foi utilizada uma combinação de cabos internos e externos de modo a explorar as vantagens de cada um dos sistemas (Hewson, N.R., 2003).

Para além do sistema de pré-esforço principal, poderá ser necessário adicionar mais cabos de modo a assegurar que, em estado limite de serviço a superestrutura esteja sujeita a um determinado valor de compressão. O que é usado muitas vezes é deixar ancoragens e desviadores para adicionar posteriormente mais pré-esforço. Também no que diz respeito às ações sísmicas poderá ser necessário adicionar pré-esforço de baixa tensão na parte superior do tabuleiro, para que, durante um sismo as juntas entre aduelas se mantenham fechadas (Veletzos, M.J., 2007).

3.4.2. PRÉ-ESFORÇO INTERIOR

O sistema de pré-esforço interior requer que as juntas entre aduelas sejam preenchidas com resina epoxi de modo a evitar a corrosão dos cabos e evitar que a calda de cimento injetada nas bainhas jorre. Como já referido, a aplicação da resina epoxi trás alguns inconvenientes. Na fase de pré-fabricação das aduelas, o facto de as bainhas serem incluídas na secção de betão, torna o processo de fabricação das aduelas mais trabalhoso e mais complexo. (Menn, C., 1990).

No entanto, o sistema de pré-esforço interior poderá ser mais vantajoso estruturalmente, já que, consegue gerar um maior momento resistente. Isto acontece porque com o pré-esforço interior existe uma maior excentricidade dos cabos uma vez estes podem situar-se no interior da laje inferior (Ariyawardena, T.M.D., 2000).

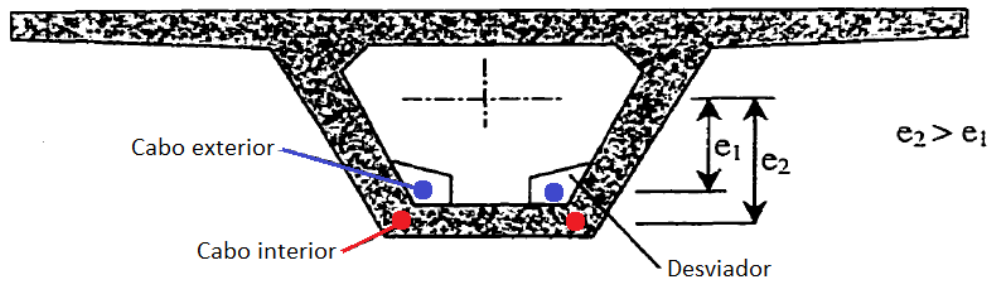


Fig. 3.24. – Comparação das excentricidades com cabos interiores e cabos exteriores
(Adaptado de Ariyawardena, T.M.D., 2000)

3.4.3. PRÉ-ESFORÇO EXTERIOR

A solução de pré-esforço exterior foi sempre muito utilizada em pontes de aduelas pré-fabricadas, quer em conjunto com pré-esforço interior, quer exclusivamente exterior.

Com este sistema, a força de pré-esforço é transferida para o betão pelas ancoragens e pelos desviadores. Assim, é necessário o dimensionamento de blocos de ancoragem e desviadores ao longo do tabuleiro (Suntharavadiel, T.G. and Aravinthan, T., 2005).

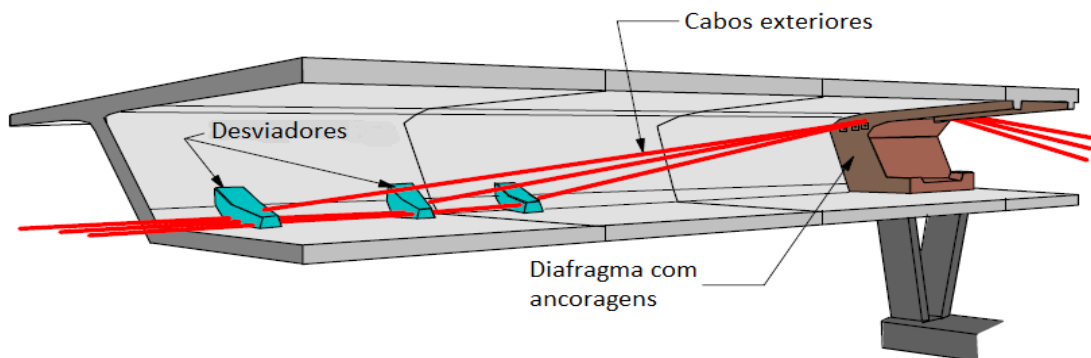


Fig. 3.25. – Sistema de pré-esforço exterior
(Adaptado de Suntharavadiel, Aravinthan 2005)

As ancoragens dos cabos de pré-esforço exterior são feitas nos diafragmas das aduelas sobre os pilares. Os diafragmas conferem rigidez suficiente para resistir às elevadas forças que atuam nas ancoragens dos cabos de pré-esforço.

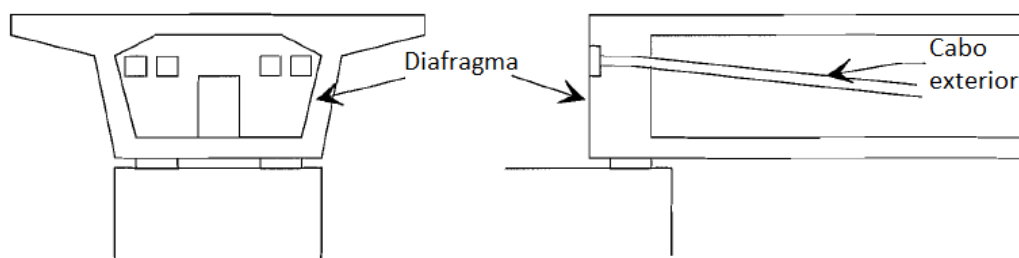


Fig. 3.26. – Aduela sobre pilar com dispositivo de ancoragem
(Adaptado de Robert, C.L. [et al.], 1993)



Fig. 3.27. – Pormenor de ancoragens de cabos de pré-esforço exterior no diafragma
(FIGG)

Os desviadores são dispositivos presentes em aduelas ao longo da superestrutura. Estes têm como função a definição do traçado dos cabos de pré-esforço e a transferência da força de pré-esforço para o tabuleiro. Devido a estas forças elevadas, estes dispositivos são pontos críticos que devem ser analisados cuidadosamente. (Ariyawardena, T.M.D., 2000, Roberts, C.L. [et al.], 1993).

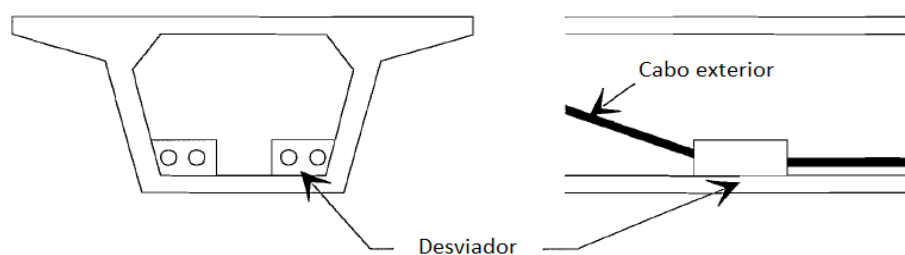


Fig. 3.28. – Aduela com desviadores de cabos de pré-esforço
(Adaptado de Robert, C.L. [et al.], 1993)



Fig. 3.29. – Pormenor de desviadores de cabos de pré-esforço exterior (FIGG)

A adoção deste tipo de pré-esforço pode trazer inúmeras vantagens tanto na fase de construção como durante o tempo de vida útil da superestrutura.

O processo de betonagem das aduelas é um processo mais simples, uma vez que, as bainhas dos cabos de pré-esforço não estão inseridas na secção de betão. Assim, a cofragem, a fixação de armaduras e a betonagem torna-se mais simples. Para além disto, é possível adotar almas de secções mais finas, o que leva a uma superestrutura mais leve.

Uma vez que há acesso a todas as zonas da bainha e como o traçado dos cabos é mais simples, a sua colocação torna-se mais fácil e rápida e menos sujeita a obstruções. A inspeção de todo o sistema de pré-esforço é um processo mais fácil, tanto na fase de construção, como durante a vida útil da obra onde serão necessárias inspeções de manutenção de modo a verificar o estado de conservação dos cabos exteriores. Durante a inspeção de manutenção os cabos poderão ser substituídos, caso se verifique a sua corrosão, ou então poderão ser novamente tencionados. Para além disto, se no futuro for necessário o aumento da força de pré-esforço no tabuleiro, facilmente se poderá adicionar novos cabos.

Outra vantagem do recurso a pré-esforço exterior, está na possibilidade da utilização de juntas secas, o que torna a construção do tabuleiro mais simples e mais rápida, levando a uma redução do custo da construção.

Uma vez que o pré-esforço exterior é não aderente, há uma menor perda de pré-esforço por atrito resultando numa força efetiva mais elevada nos cabos (Ariyawardena, T.M.D., 2000, Hewson, N.R., 2003, Rombach, G., 2002).

No entanto, paralelamente às vantagens deste tipo de sistema de pré-esforço surgem algumas desvantagens.

O pré-esforço externo poderá ser mais caro por duas razões. Por ser externo, os elementos do sistema de pré-esforço são mais caros. Por ser menos eficiente é necessário a aplicação de mais pré-esforço. Em resultado da menor excentricidade dos cabos é necessário uma maior força de pré-esforço, ou seja, os cabos exteriores requerem maior valor de pré-esforço para gerar o mesmo momento resistente que uma solução com cabos internos. Para além disto, o cálculo deste tipo de sistema de pré-esforço é significativamente mais complexo.

As ancoragens e os desviadores são outro problema devido às elevadas forças concentradas nestes dispositivos. Estes são pontos críticos na estrutura, devendo por isso, ser cuidadosamente dimensionados e vistoriados ao longo da vida útil da obra. Os cabos externos são completamente dependentes das ancoragens, visto que, no caso da falha de uma ancoragem, todo o cabo falha ao

longo da sua extensão, pondo em causa a segurança da superestrutura. Também a falha de um desviador pode resultar na perda parcial, ou até mesmo total, do pré-esforço.

A fadiga e abrasão dos cabos pode ser um problema se a sua extensão livre for muito grande, pois estes ficarão susceptíveis a vibrações. Assim, o comprimento livre dos cabos deve ser limitado.

O facto de os cabos externos serem mais acessíveis também tem as suas desvantagens, uma vez que estão mais expostos, tornando-se mais vulneráveis à corrosão, à ação do fogo, à exposição a agentes químicos, etc. (Ariyawardena, T.M.D., 2000, Hewson, N.R., 2003).

3.4.4. ASPETOS DE DIMENSIONAMENTO

3.4.4.1. Pré-esforço interior

Usualmente, no sistema de pré-esforço interior os cabos são totalmente aderentes. Assim, para se determinar a resistência última do cabo pode proceder-se a uma análise seccional. Uma vez que existe uma total compatibilidade entre a extensão no cabo e o betão adjacente a este, a aplicação de uma ação exterior irá provocar uma deformação conjunta dos cabos de pré-esforço e da secção do betão. À medida que aumenta o carregamento poderá ocorrer a abertura de juntas, e nesse caso, como os cabos são aderentes, estes sofrem deformações localizadas nessa zona da abertura, o que faz com que a tensão no aço aumente.

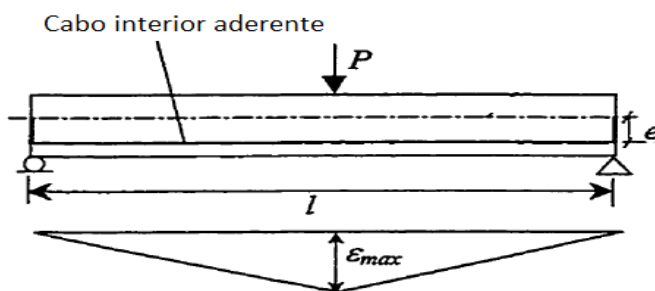


Fig. 3.30. – Variação da deformação do cabo de pré-esforço interior aderente
(Adaptado de Ariyawardena, T.M.D., 2000)

Para além de introduzirem o esforço de compressão na estrutura, os cabos de pré-esforço interior aderente, podem funcionar como armadura convencional, o que permite um melhor comportamento em relação à abertura de fendas. Isto é possível devido à aderência dos cabos com o betão.

No que diz respeito à rotura prevê-se que, uma superestrutura com pré-esforço interior, tenha uma rotura para valores de carga superiores quando comparado com uma superestrutura com pré-esforço exterior (Ariyawardena, T.M.D., 2000, Tarrataca, T.J.S., 2009).

3.4.4.2. Pré-esforço exterior

No sistema de pré-esforço exterior os cabos não são aderentes, logo a deformação do cabo não está relacionada com a deformação em cada secção pela condição de compatibilidade. Com a aplicação de uma carga na estrutura a deformação no cabo será uniforme entre os dispositivos de ligação ao betão (ancoragens). Assim, no caso de ocorrência da abertura de uma junta, o valor da abertura irá ser distribuído ao longo de todo o comprimento do cabo, o que resulta num menor aumento de tensão no

aço, quando comparado com o aumento de tensão localizada no pré-esforço interior (Ariyawardena, T.M.D., 2000, Tarrataca, T.J.S., 2009).

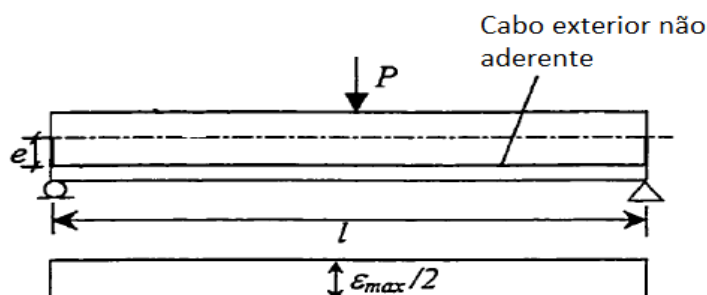


Fig. 3.31. – Variação da deformação do cabo de pré-esforço exterior não aderente (Adaptado de Ariyawardena, T.M.D., 2000)

3.5. ANÁLISE LONGITUDINAL

3.5.1. ANÁLISE ELÁSTICA

Este método de análise é utilizado para na análise estrutural da superestrutura em condições de serviço, uma vez que, nesta condição toda a superestrutura está comprimida e assim os esforços e reações podem ser calculados tendo por base o comportamento elástico (Rombach, G., 2002).

No caso de uma superestrutura exclusivamente com pré-esforço interior aderente, é possível fazer verificações em estado limite último através de análises seccionais, uma vez que, em serviço, a superestrutura está sujeita a elevadas tensões de compressão, fazendo com que a abertura das juntas seja bem controlada. Assim, o aumento de tensão localizada nos cabos aquando da abertura das juntas torna aceitável uma análise seccional para a verificação à segurança de uma solução de pré-esforço interior. Já no caso de uma solução com pré-esforço exterior, a análise elástica não será suficiente (Tarrataca, T.J.S., 2009).

3.5.2. ANÁLISE PLÁSTICA

O método de análise plástica permite fazer uma estimativa da capacidade estrutural mediante a consideração de rótulas plásticas. No entanto, não é possível a determinação precisa da flexa da estrutura. Quando se atinge o estado limite último as juntas entre aduelas abrem-se, a estrutura perde drasticamente rigidez e alcança uma flecha considerável. No caso de uma solução com pré-esforço exterior, as deformações não se transmitem diretamente aos cabos, o que acontece é um incremento da sua extensão entre pontos fixos. A distribuição das forças na estrutura depende muito das deformações globais da estrutura na medida em que as deformações produzem variações nas tensões dos cabos que não podem ser analisados seccão a seccão (Tarrataca, T.J.S., 2009).

No caso de uma superestrutura contínua, o mecanismo de colapso corresponde à formação de três rótulas plásticas, que geralmente ocorrem a meio vão e junto dos pilares.

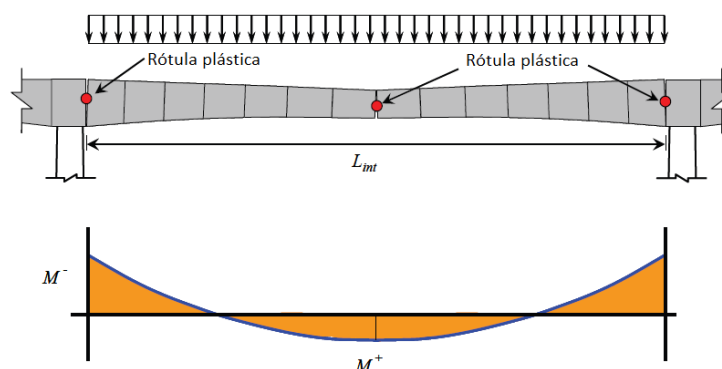


Fig. 3.32. – Formação de rótulas plásticas
(Adaptado de Veletzos, M. and Restrepo, J.I., 2013)

3.5.3. ANÁLISE NÃO LINEAR COM MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Este tipo de superestruturas com pré-esforço exterior e aduelas pré-fabricadas têm um comportamento não linear no momento da pré-rotura. Assim, o seu comportamento não deve ser analisado com métodos convencionais de análise linear.

Com recurso a programas de cálculo automático, é possível (mas não fácil) fazer uma análise não linear com modelação por elementos finitos. Com este método de análise é possível considerar com rigor a existência dos cabos de pré-esforço e determinar a capacidade de rotação das juntas. No entanto, é complexo fazer a definição da interação dos cabos de pré-esforço externo com a estrutura e a definição do comportamento das chaves nas juntas, bem como o comportamento do material betão e a interação/aderência das armaduras passivas e ativas ao betão (Rombach, G., 2002).

De modo a contabilizar a transmissão de esforços de corte interessa modelar as juntas geometricamente. É recomendado que este método análise seja calibrado com ensaios experimentais.

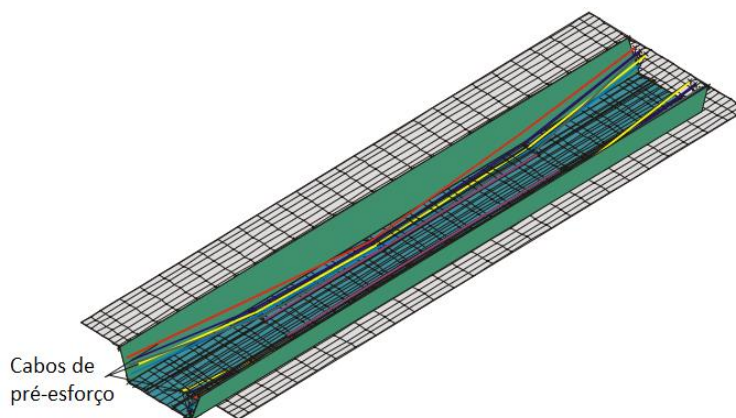


Fig. 3.33. – Modelo de elementos finitos de um tramo
(Rombach, G., 2002)

3.6. COMPORTAMENTO SÍSMICO

3.6.1. ASPETOS GERAIS

A utilização de pontes de aduelas pré-fabricadas em zonas sísmicas ainda é limitada. Esta limitação advém do facto de ainda haver incertezas no comportamento das juntas na transferência de esforços entre aduelas quando a estrutura está sujeita a uma ação sísmica. Ao contrário das pontes de aduelas betonadas *in-situ*, onde existe armadura ordinária ao longo das juntas, nas pontes de aduelas pré-fabricadas não existe armadura ordinária nas juntas o que faz que estes locais sejam zonas de descontinuidade. Esta descontinuidade nas juntas cria pontos fracos que podem funcionar como pontos de rotação localizados. Assim, surgem várias dúvidas no que diz respeito ao comportamento das juntas durante um evento sísmico, nomeadamente se as juntas vão abrir durante o sismo, se vão ficar abertas depois do sismo e se essas aberturas vão alterar o comportamento estrutural da ponte. Esta são algumas incertezas que limitam no uso de pontes de aduelas pré-fabricadas em zonas de atividade sísmica (Veletz, M.J., 2007, Veletz, M.J. and Restrepo, J.I., 2013).

Embora haja todas estas incertezas, é possível fazer um correto dimensionamento deste tipo de estruturas para uma zona sísmica. Para isso será necessário ter em conta alguns aspetos particulares a nível estrutural e construtivo.

3.6.2. ASPETOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento é feito segundo o princípio “pilar fraco – viga forte”, ou seja permitir rótulas plásticas nos pilares e manter a superestrutura com um comportamento elástico. Assim, o dimensionamento sísmico deve ser feito de modo a que a ponte apresente flexibilidade suficiente para suportar os deslocamentos provocados pelo sismo. Para isto, é possível dimensionar certos mecanismos de rotura nos pilares da ponte de modo a que haja dissipação de energia, aumentando a ductilidade. Os pilares são dimensionados de modo a sofrerem uma deformação plástica controlada, no topo ou na base, durante a ação sísmica, continuando a suportar a carga axial. Já as fundações e a superestrutura são dimensionadas de modo a serem mais resistentes que os pilares e assim os mecanismos de rotura ocorrem no local desejado. A localização destes mecanismos de rotura nos pilares permite que após um sismo seja mais fácil a sua inspeção e reparação. Com esta forma de dimensionamento reduz-se consideravelmente o risco de danificar as fundações ou a superestrutura (Veletz, M.J., 2007). Para além dos referidos mecanismos de rotura nos pilares para a dissipação de energia, um outro meio para melhorar a dissipação de energia consiste na construção de aduelas de fecho betonadas *in-situ*. Esta solução tem como vantagem a redução dos deslocamentos residuais da superestrutura após a ocorrência de um sismo, no entanto, tem como desvantagem o facto de a sua construção ser complexa, demorada e com maiores custos.

O dimensionamento do sistema de pré-esforço é uma etapa com grande influência no comportamento final da superestrutura sob ação sísmica. Assim, é pertinente referir alguns aspetos relativos a esta temática.

Quando sujeitos a rotações nas juntas, os cabos de pré-esforço exterior não aderente sofrem menos tração do que os cabos de pré-esforço interior aderente. Isto acontece devido ao facto de a tração que se gera nos cabos de pré-esforço exterior não aderente se distribuir ao longo do comprimento dos cabos, ao contrário do que acontece nos cabos de pré-esforço interior aderente onde a tração nos cabos é localizada nas juntas. Assim, com pré-esforço interior haverá maiores deformações e aberturas

permanentes das juntas, o que poderá ser apontado como uma desvantagem deste tipo de sistema de pré-esforço (Tarrataca, T.J.S., 2009).

A aplicação combinada de pré-esforço interior e exterior, nas superestruturas de pontes com aduelas pré-fabricadas, em zonas de elevada sismicidade, deve ser evitado, uma vez que, a força resistente não é repartida conjuntamente, mas sim de uma forma sequencial, em que o pré-esforço interior tem de resistir a grande parte das ações até à rotura. Assim, a combinação dos dois tipos de pré-esforço origina menor ductilidade e menor capacidade de deformação da estrutura. Por isto, a utilização de pré-esforço exterior deve ser preferida de modo a diminuir deformações permanentes após o sismo e a abertura permanente das juntas entre aduelas, melhorando-se a ductilidade da superestrutura. Com a utilização na totalidade de pré-esforço exterior, poderá ser necessário aplicar cabos de pré-esforço adicionais no topo da secção de modo a resistir à inversão das deformações a meio vão (Cooper, T.R. and Murillo, J.A., 2004, Scible, F. and Megally, S., 2001).

4

CONSTRUÇÃO TRAMO A TRAMO COM RECURSO A LANÇADEIRA REFORÇADA COM O SISTEMA OPS (MÉDIO-GRANDE VÃO)

4.1. SISTEMA OPS

4.1.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

O sistema OPS (pré-esforço orgânico), é assim designado por ser baseado numa estrutura orgânica, o músculo. Os músculos são sistemas estruturais com rigidez variável, onde a variação de rigidez é feita graças ao fornecimento de energia. Pode considerar-se que o músculo é uma forma de pré-esforço auto-ajustável, isto é., com características adaptativas, evitando assim, as tensões indesejáveis que o pré-esforço convencional implica. O pré-esforço orgânico é mais eficiente por ser variável, atuando apenas quando necessário.

O OPS é um sistema de pré-esforço no qual as forças aplicadas são automaticamente ajustadas às cargas atuantes por um sistema de controlo, de forma a reduzir deformações e minimizar tensões. A materialização do conceito de OPS inclui três elementos fundamentais: as ancoragens, os cabos de pré-esforço (não aderente) e o circuito eletrónico.

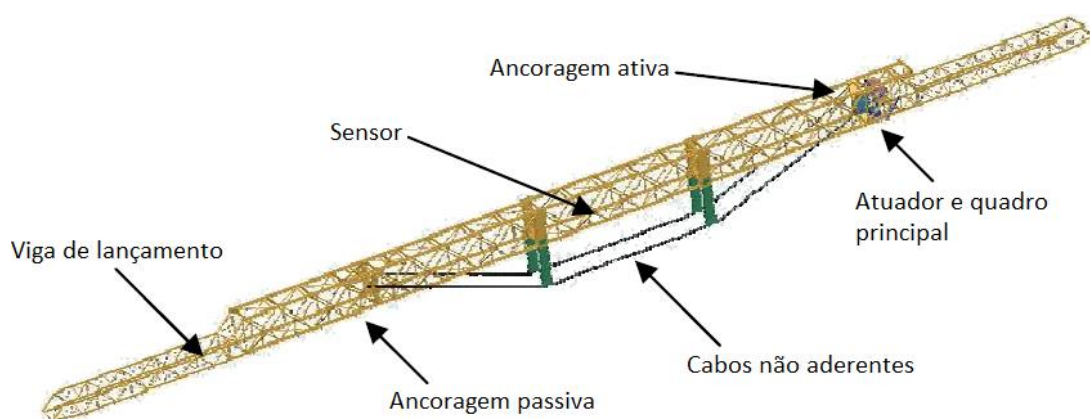


Fig. 4.1. – Elementos do sistema OPS numa viga de lançamento (Guerra, A. [et al.], 2005)



Fig. 4.2. – Ancoragem ativa (esquerda); Ancoragem passiva (direita)
(Guerra, A. [et al.], 2005)

O controlo do OPS é realizado a partir de uma secção de controlo. A informação recolhida na secção de controlo é transmitida ao autómato e processada de acordo com um algoritmo de controlo e, de acordo com a necessidade, o sistema ou se mantém num estado de inatividade ou então faz variar a força do pré-esforço. A variação da tensão nos cabos de pré-esforço é realizada com cursos elementares do êmbolo do cilindro hidráulico, afastando ou aproximando a ancoragem ativa.

A aplicação pré-esforço orgânico em vez de pré-esforço convencional deve-se ao facto de o baixo peso próprio da estrutura metálica impossibilitar a aplicação de uma só vez de todo o pré-esforço necessário para a situação de carregamento máximo. Se fosse aplicado o pré-esforço necessário para o carregamento total, numa fase em que há ausência de carregamento ou um carregamento moderado, poder-se-ia introduzir uma contra-flexa muito levada que pode causar problemas de instabilidade, devido a tensões de compressão elevadas nos banzos dimensionados para resistir a tensões de tração. (André, A.M. [et al.], 2004, André, A.M. [et al.], 2003, Guerra, A. [et al.], 2004).

4.1.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS

A aplicação de pré-esforço orgânico tem como principais vantagens a redução das deformações do equipamento construtivo e da sua massa estrutural e aumento da capacidade de carga.

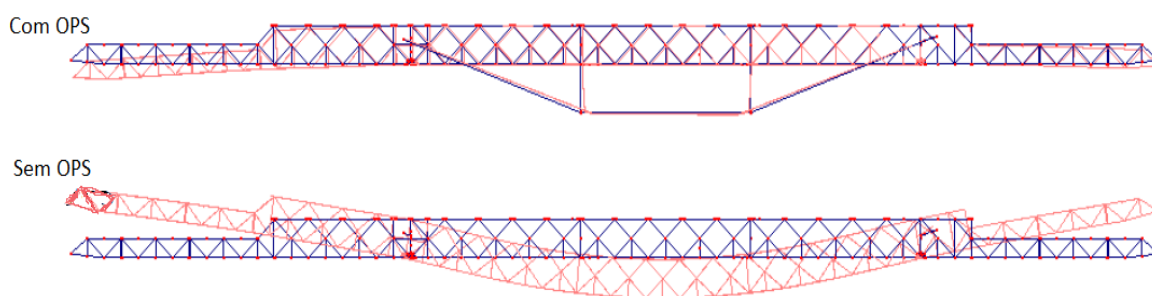


Fig. 4.3. – Deformação de um cembre com e sem OPS
(Guerra, A. [et al.], 2004)

A redução da massa estrutural do equipamento construtivo pode ter valores na ordem dos 30%. Esta redução, para além de se fazer sentir na redução do custo de aquisição, também tem uma grande redução no custo de exploração, nomeadamente no armazenamento, transporte, montagem e movimentação em obra, os quais, poderão significar, na vida de um cimbra com 6 utilizações, o dobro do seu custo de aquisição (Guerra, A. [et al.], 2004). Para além disto, o menor peso pode implicar poupança nos pilares e no tabuleiro por redução das ações devidas ao método construtivo.

A utilização do sistema OPS requer cuidado especial em algumas matérias, nomeadamente a instabilidade e hiperatividade do sistema de controlo e a fadiga do aço (André, A.M. [et al.], 2003).

4.2. PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS

4.2.1. CONSTRUÇÃO DE MÉDIO VÃO

4.2.1.1. Configuração da lançadeira

Para a construção de médio vão, de aproximadamente 50 metros, utiliza-se uma lançadeira desenvolvida pela BERD denominada por LG50. Esta lançadeira é constituída por duas treliças metálicas dispostas paralelamente (vigas principais) e unidas por travamentos extremos. Nas cordas superiores das vigas circula uma ponte rolante que tem a função de realizar o transporte, posicionamento e montagem de aduelas, beneficiando de 6 graus de liberdade para movimentação da aduela: movimentos de rotação e movimentos lineares nos 3 eixos. O apoio das vigas é assegurado por dois pórticos de apoio que por sua vez se apoiam nos pilares já construídos. Para além disto ainda existe uma pata traseira e uma pata dianteira que auxiliam a lançadeira no processo de avanço e na colocação das aduelas. Por fim, esta lançadeira está equipada com o sistema OPS onde o traçado dos cabos é trilinear com escoras de desvio próximas do 1/4 de vão (BERD, 2013a).

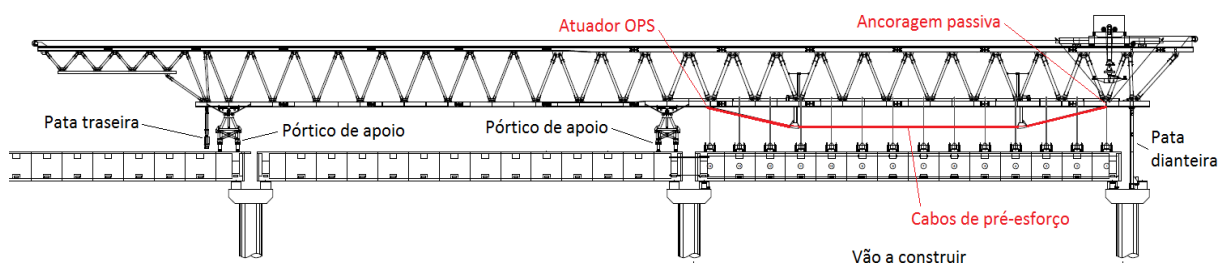


Fig. 4.4. – Configuração da LG50
(Adaptado de BERD, 2013b)

4.2.1.2. Operação da lançadeira

Após a conclusão da construção de um vão da ponte, a lançadeira pode avançar para o vão seguinte. O processo de avanço da lançadeira para o vão seguinte inicia-se com a recolha das escoras de desvio do sistema OPS. Posto isto, a pata traseira é colocada em carga e o pórtico de apoio traseiro é desativado. Este pórtico é agora transportado para a extremidade do tabuleiro acabado de construir e é colocado em carga. A pata dianteira é desativada e de seguida monta-se o sistema de locomoção (subida do contrapeso e fixação do pórtico à ponte rolante). Posto isto a pata traseira é desativa e procedesse à primeira parte do avanço da lançadeira (aproximadamente 25 metros). Após este primeiro avanço, são feitos alguns ajustes altimétricos e planimétricos da lançadeira LG50, de modo a

esta ficar na posição desejada, e logo de seguida procede-se à segunda parte do avanço da lançadeira até ao apoio dianteiro (aproximadamente 25 metros).

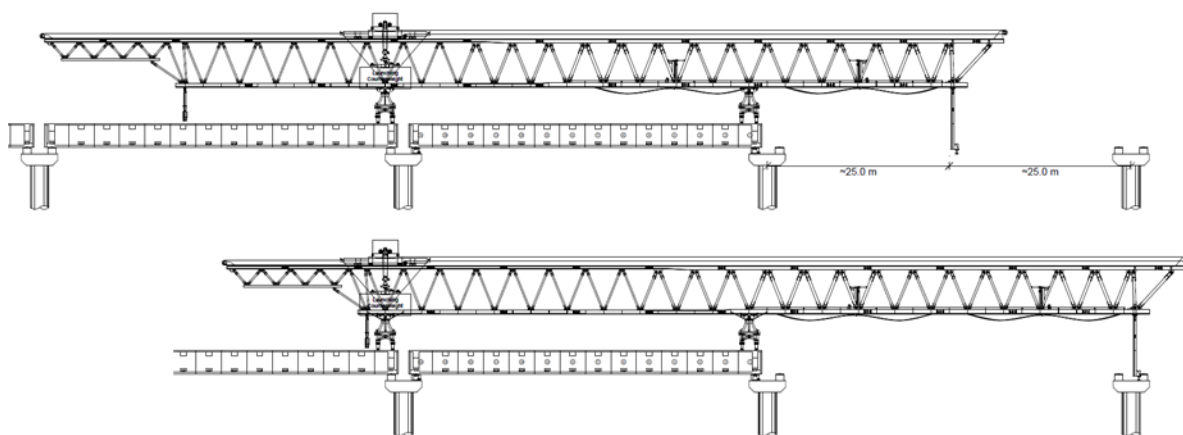


Fig. 4.5. – Avanço da lançadeira (BERD, 2013b)

Estando concluído o avanço, a pata dianteira é colocada em carga e são montadas as escoras de desvio do sistema OPS. Estando agora a lançadeira apoiada na pata dianteira e nos dois pórticos de apoio, já se pode dar início à colocação das aduelas.

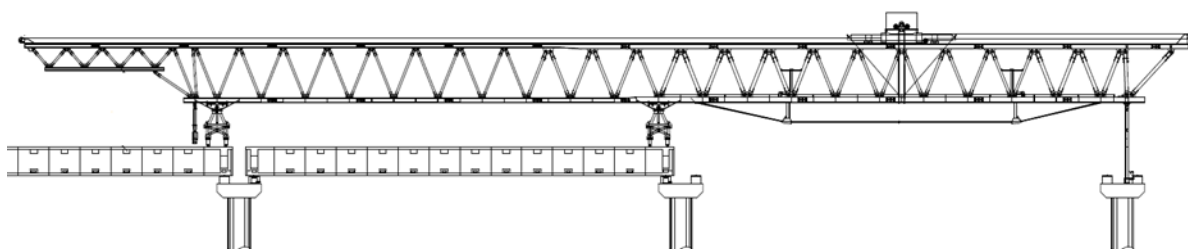


Fig. 4.6. – Lançadeira em posição para colocação das aduelas (BERD, 2013b)

A colocação das aduelas inicia-se com a pré-suspensão de 7 aduelas. Após a colocação da aduela 0 fixa-se a posição planimétrica com recurso a fusos de ligação ao tabuleiro anterior. Após o posicionamento da aduela 1 fixa-se a posição altimétrica do conjunto com a colocação do cilindro vertical traseiro em carga e ajuste dos fusos de ligação ao tabuleiro anterior. Seguidamente são assembladas as restantes aduelas não pré-suspensas. Por fim, as 7 aduelas pré-suspensas são assembladas.

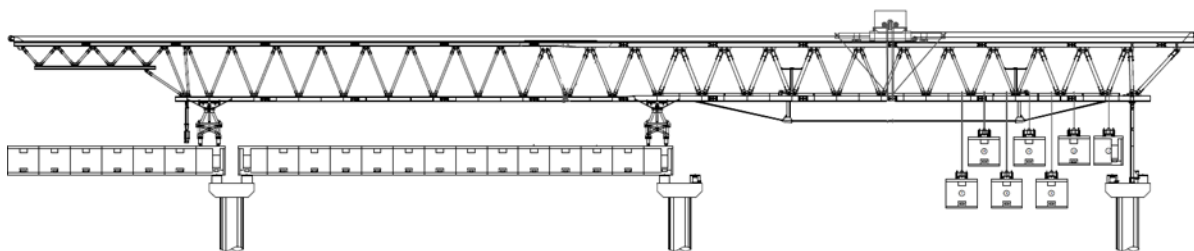


Fig. 4.7. – Pré-suspensão de 7 aduelas
(BERD, 2013b)

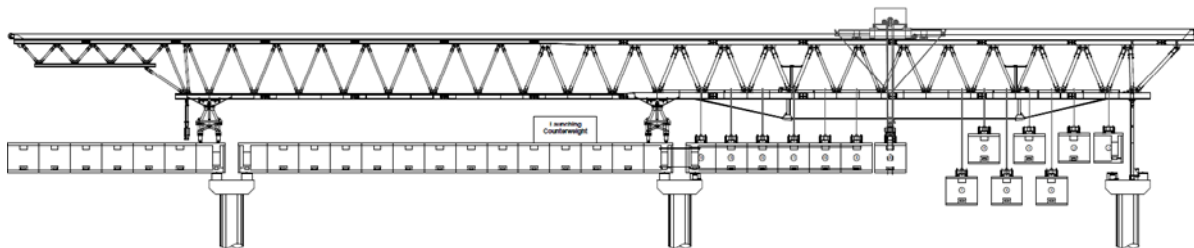


Fig. 4.8. – Procedimento construtivo
(BERD, 2013b)

Após a assemblagem de todas as aduelas do vão colocam-se os cilindros verticais de ajuste geométrico em carga (carga mínima) e aplica-se parte do pré-esforço longitudinal final. Em seguida são acionados os cilindros verticais de ajuste geométrico para tornar o tabuleiro autoportante e libertar a lançadeira. Posto isto, as barras de suspensão são retiradas e a lançadeira já se pode dar início ao avanço para o vão seguinte.

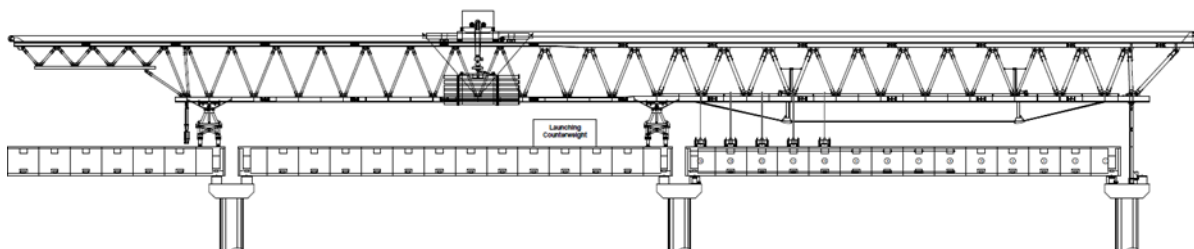


Fig. 4.9. – Fase final do processo construtivo do vão
(BERD, 2013b)

4.2.2. CONSTRUÇÃO DE GRANDE VÃO

4.2.2.1. Configuração da lançadeira

Na construção de grande vão, aproximadamente 90 metros, é utilizada uma lançadeira desenvolvida pela BERD denominada por LG90. Esta lançadeira é constituída por duas treliças metálicas dispostas paralelamente (vigas principais). Estas vigas têm como apoio, dois pórticos de pilar, um pórtico de avanço, um pórtico provisório traseiro e um pórtico provisório dianteiro. Estes apoios são ativados e desativados consoante a fase da operação da lançadeira, ou seja, estando a lançadeira na fase de avanço ou na fase de colocação das aduelas. Para o transporte, posicionamento e montagem das aduelas é utilizada uma ponte rolante com 6 graus de liberdade que possibilita a movimentação das aduelas em movimentos lineares nos 3 eixos e em movimentos de rotação. Para além disto, esta lançadeira está equipada com o sistema OPS.

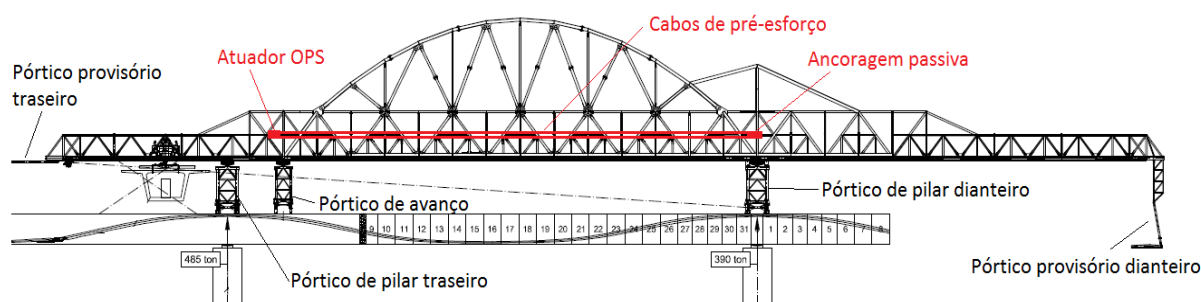


Fig. 4.10. – Configuração da LG90
(Adaptado de BERD, 2012a)

4.2.2.2. Operação da lançadeira

Concluída a construção do vão, o pórtico de pilar traseiro é colocado em carga e o pórtico de avanço é transportado, cerca de 20 metros, e colocado em carga. Posto isto, o pórtico de pilar traseiro é desativado e inicia-se a primeira fase de avanço da viga de aproximadamente 25 metros. Acabada a primeira fase de avanço com a chegada do pórtico provisório dianteiro ao pilar dianteiro, este pórtico provisório é colocado em carga. De seguida a aduela 0, segmentada em 3 aduelas mais pequenas, é transportada e colocada sobre o pilar dianteiro e o pórtico provisório traseiro é colocado em carga. O pórtico de pilar traseiro é transportado até ao pórtico de avanço e o pórtico provisório traseiro é desativado. Posto isto, o pórtico de pilar traseiro é transportado e ativado sobre a aduela 0 no pilar dianteiro. Agora, o pórtico provisório dianteiro é desativado e a lançadeira avança cerca de 30 metros. Posto isto, o pórtico provisório traseiro é colocado em carga e o pórtico de avanço é desativado, transportado (70 metros) e colocado em carga e o pórtico provisório traseiro é novamente desativado. De seguida inicia-se a última fase de avanço da lançadeira (aproximadamente 35 metros) e o seu posicionamento para a colocação das aduelas (BERD, 2012a).

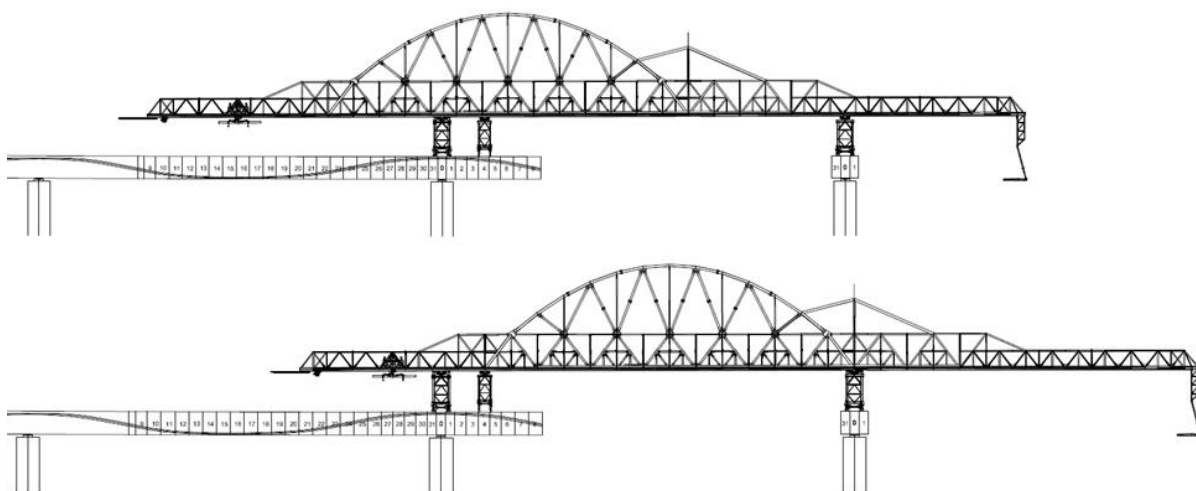


Fig. 4.11. – Avanço final da lançadeira
(BERD, 2012b)

Durante a colocação das aduelas a lançadeira está apoiada no pórtico de pilar dianteiro e no pórtico de avanço.

O processo construtivo inicia-se com a pré-suspensão das 7 primeiras aduelas do vão e das 7 aduelas do vão seguinte. Nesta pré-suspensão as aduelas ficam próximas da sua posição final. Posto isto, as aduelas pré-suspensas são assembladas e inicia-se a assemblagem das restantes aduelas do vão.

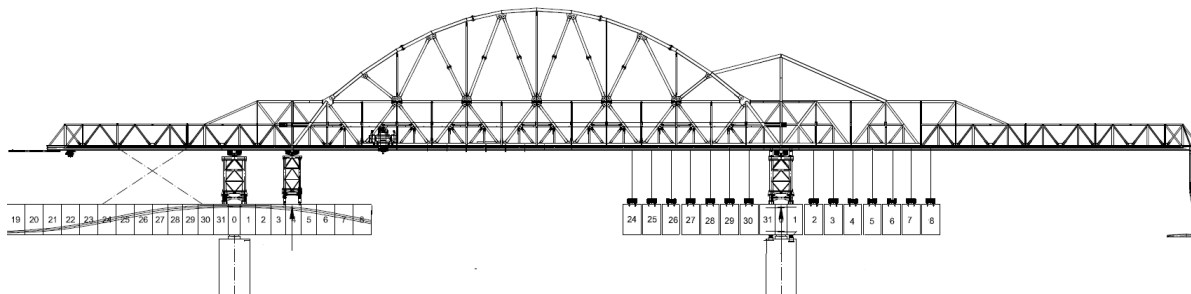


Fig. 4.12. – Pré-suspensão das 7 aduelas do vão e das 7 aduelas do vão seguinte
(Adaptado de BERD, 2012b)

Após a assemblagem de todas as aduelas é feita a betonagem da junta de fecho e da junta entre a aduela 31 e aduela 30, e aplica-se parte do pré-esforço longitudinal final. Em seguida a lançadeira é descida através de ajustes nos cilindros hidráulicos do pórtico de avanço e do pórtico de pilar dianteiro. Após este procedimento a lançadeira fica liberta e o tabuleiro é agora autoportante. As barras de suspensão e a cofragem da junta de fecho são removidas. Acabado o ciclo construtivo, a lançadeira já pode dar início ao avanço para o vão seguinte.

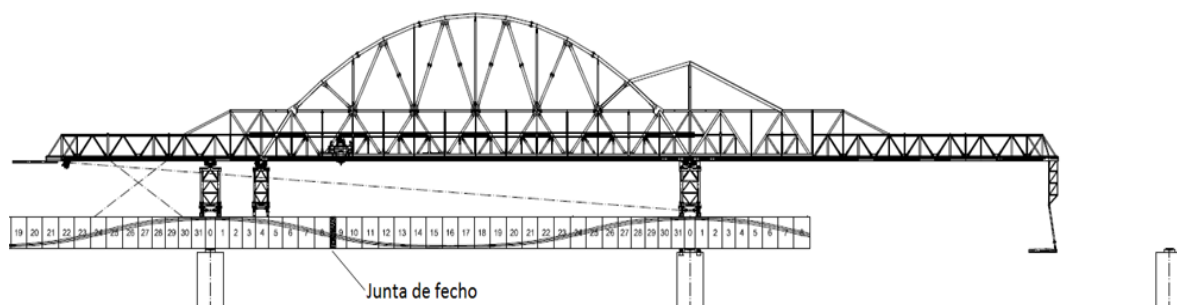


Fig. 4.13. – Fim do ciclo construtivo
(BERD, 2012b)

4.2.3. INTERAÇÃO LANÇADEIRA – TABULEIRO DA PONTE

Durante o processo construtivo com a LG90, esta está apoiada no pórtico de pilar dianteiro e no pórtico de avanço. Por sua vez, o pórtico de avanço apoia-se no troço de tabuleiro em consola. A elevada solicitação do pórtico de avanço, ao longo do processo construtivo, sobre o troço de tabuleiro poderá causar a sua deformação vertical.

Ao longo do processo construtivo podem surgir esforços no tabuleiro em construção. Estes esforços ocorrem pois o sistema estrutural vai evoluindo à medida que se colocam as aduelas e porque a rigidez do tabuleiro é superior à rigidez da lançadeira. Assim, todos os procedimentos adotados ao longo do processo construtivo devem ser analisados de modo a que a sua implementação seja possível e eficaz.

4.3. MORFOLOGIA DOS PRINCIPAIS DESVIOS GEOMÉTRICOS NA CONSTRUÇÃO DO TABULEIRO

4.3.1. TIPOLOGIA DE DESVIOS

Os desvios geométricos podem surgir por vários motivos e em diferentes fases da construção do tabuleiro. Desvios geométricos que ocorrem durante a fase de pré-fabricação das aduelas podem originar grandes desvios no alinhamento final do tabuleiro. Também durante a colocação das aduelas podem ocorrer desvios geométricos que põem em causa toda a geometria do tabuleiro.

Os desvios geométricos na construção de tabuleiros com aduelas pré-fabricadas podem ser classificados com sendo eventuais ou intrínsecos. Os desvios eventuais são aqueles que poderão, ou não, ocorrer em qualquer uma das fases construtivas. No que diz respeito aos desvios intrínsecos, estes são desvios que estão associados a um procedimento, ou seja, na realização desse procedimento pressupõe-se a ocorrência de um desvio.

4.3.2. DESVIOS NOS PILARES

Um dos eventuais desvios que poderão ocorrer são os desvios nos pilares. Estes poderão interferir com a geometria do tabuleiro. Um tipo de desvio possível será quando a cota de um pilar está acima ou abaixo da cota desejada, causando uma alteração do alinhamento vertical (em alçado) do tabuleiro.

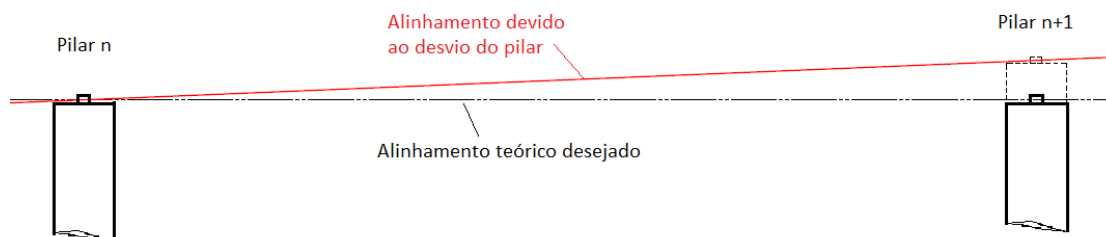


Fig. 4.14. – Alteração do alinhamento vertical (alçado) do tabuleiro devido a desvio da cota do pilar.

Outro tipo de desvio será quando os pilares não estão devidamente alinhados, o que se irá refletir no alinhamento horizontal (em planta) do tabuleiro.

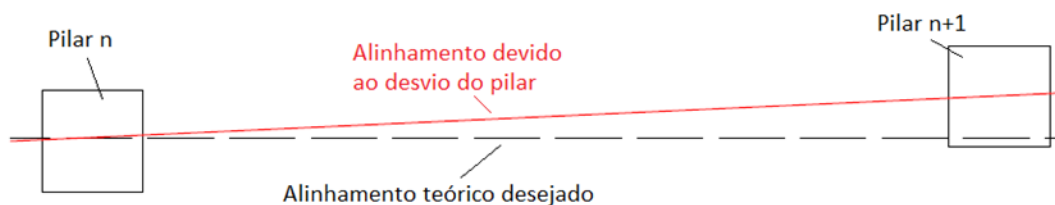


Fig. 4.15. – Alteração do alinhamento horizontal (planta) devido a desvio no alinhamento dos pilares

Estes eventuais desvios nos pilares poderão ser mais problemáticos na construção com a LG90 uma vez que poderão ocorrer grandes desvios, na zona da junta de fecho, entre a consola previamente construída e o troço de tabuleiro em construção.

De modo a corrigir estes tipos de desvios, um procedimento possível é fazer um enchimento dos plintos dos pilares.

4.3.3. DESVIOS NA ADUELA 0

Durante a fase de pré-fabricação poderá ocorrer um eventual desvio na geometria da aduela 0. Este poderá causar um desvio no alinhamento vertical (em alçado) ou horizontal (em planta) do tabuleiro.

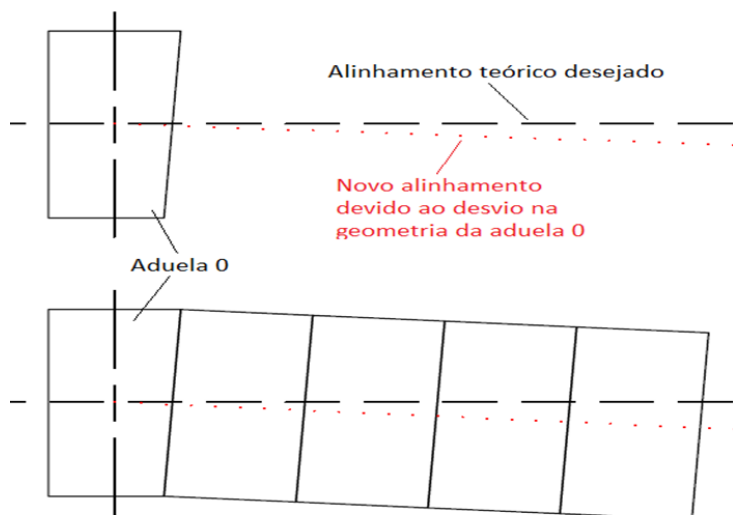


Fig. 4.16. – Alteração no alinhamento devido a desvio na geometria da aduela 0

Outro tipo de desvio associado à aduela 0 poderá surgir aquando do seu posicionamento em obra. A colocação da aduela 0 sobre o pilar é uma operação fundamental para a correta definição da geometria do tabuleiro. Esta deve ser colocada sobre o pilar e ajustada através de macacos hidráulicos de maneira a que fique colocada o mais próximo possível da posição desejada

No caso de um desvio na orientação da aduela 0, o tabuleiro será construído segundo um alinhamento que não é o desejado. O desvio na orientação da aduela poderá alterar tanto o alinhamento vertical (em alçado) como o alinhamento horizontal (em planta). De facto, muito dificilmente a aduela 0 ficará na posição correta, logo, haverá sempre algum desvio do alinhamento teórico desejado. No entanto, esta aduela poderá ser ajustada pelos cilindros de ajuste ao longo do processo construtivo.

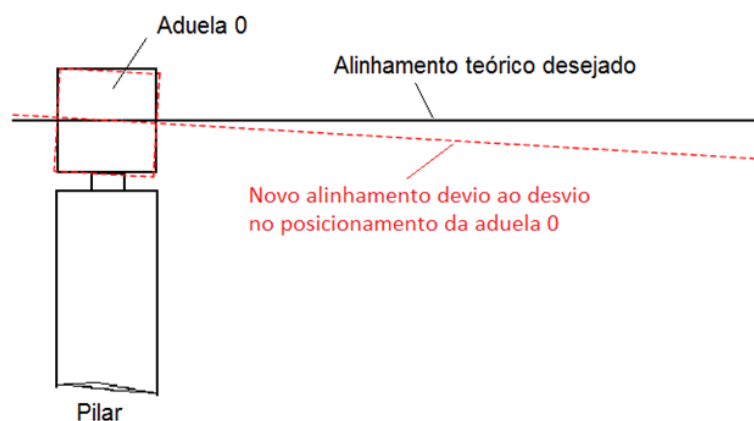


Fig. 4.17. – Alteração do alinhamento vertical (em alçado) devido ao desvio no posicionamento da aduela 0

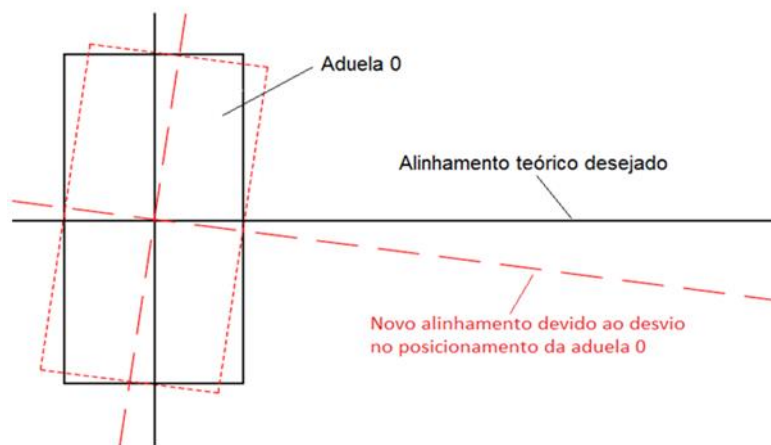


Fig. 4.18. – Alteração do alinhamento horizontal (em planta) devido ao desvio no posicionamento da aduela 0

4.3.4. DESVIOS NAS ADUELAS

Durante a pré-fabricação das aduelas é muito provável que venham a ocorrer desvios na geometria das aduelas. Assim, se este desvio não for corrigido, durante a fase de instalação das aduelas o tabuleiro será construído segundo um alinhamento que não é o desejado. Um desvio de poucos milímetros na geometria de uma aduela irá refletir-se de forma amplificada ao longo de toda a superestrutura.

Estes desvios na geometria das aduelas em relação à geometria teórica desejada podem ter origem, por exemplo, num erro de alinhamento da aduela de contra molde ou em tensões secundárias devido a ações térmicas provenientes do processo de cura do betão.

Este desvio na geometria da aduela tanto pode causar alterações no alinhamento horizontal (em planta) como no alinhamento vertical (em alçado) do tabuleiro.

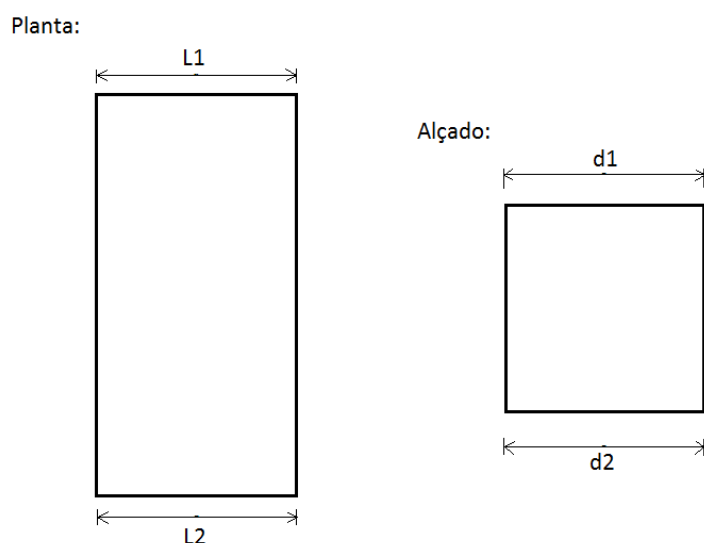


Fig. 4.19. – Plano médio de uma aduela em planta (esquerda) e alçado (direita)

A figura 4.19. demonstra os planos médios em planta e em alçado de uma aduela, sendo $L1$ e $L2$ a largura nas extremidades da aduela, $d1$ a largura no topo e $d2$ a largura na base. Um desvio na geometria da aduela do tipo $L2 < L1$ ou $L1 < L2$, causa um desvio no alinhamento horizontal (planta) desejado.

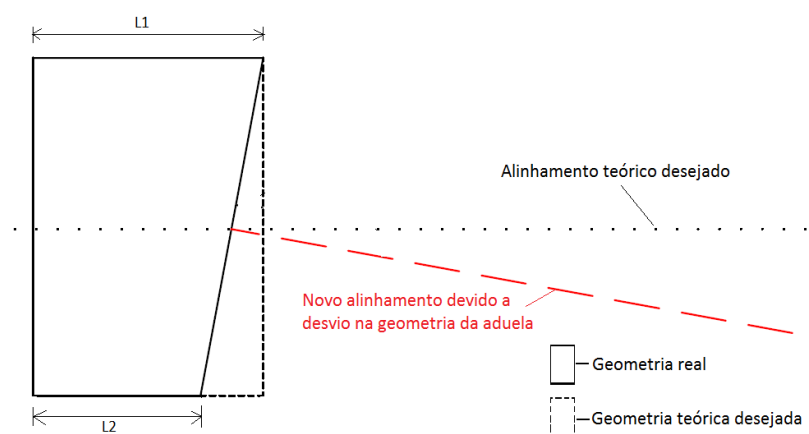


Fig. 4.20. – Alteração do alinhamento horizontal (planta) devido a desvio na geometria da aduela

Um desvio do tipo $d1 < d2$ ou $d2 < d1$, causa um desvio no alinhamento vertical (alçado) desejado.

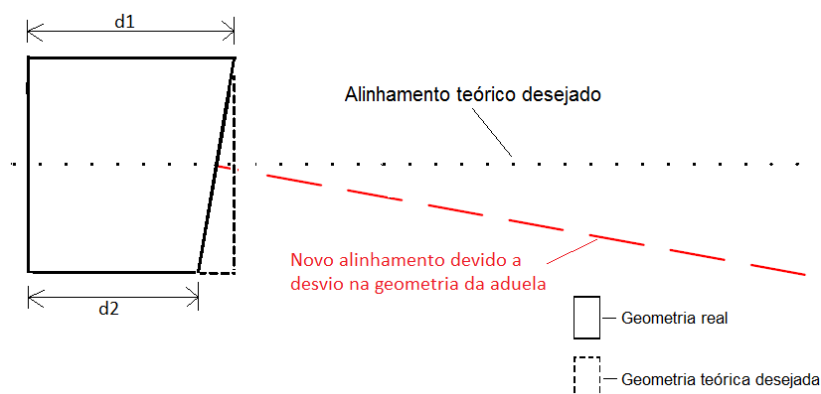


Fig. 4.21. – Alteração do alinhamento vertical (alçado) devido a desvio na geometria da aduela

Para além de um eventual desvio na geometria de uma aduela, também pode ocorrer um desvio sistemático. Este tipo de desvio consiste na repetição sistemática de um desvio ao longo de todo o processo de pré-fabricação das aduelas. Este pode ser resultado de um erro computacional ou até mesmo de um defeito nos equipamentos de cofragem fixa que sistematicamente repete o mesmo desvio sempre que uma aduela é betonada. Mesmo que o desvio seja pequeno, como é um desvio sistemático, todas as aduelas serão produzidas com este desvio o que leva a que no final se obtenha um grande desvio do alinhamento desejado. A figura 4.22. mostra que um pequeno desvio (d) introduzido na produção de cada aduela provoca, ao fim da colocação de algumas aduelas, um grande desvio (D).

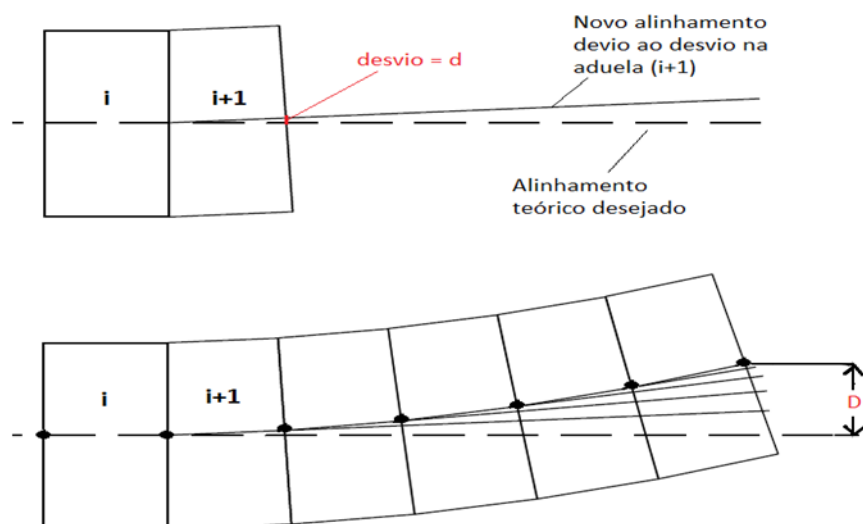


Fig. 4.22. – Esquema do desvio sistemático

4.3.5. DESVIOS NO PROCESSO CONSTRUTIVO

Um dos mais relevantes desvios geométricos inerentes à construção tramo a tramo está associado à deformação da lançadeira ao longo da construção do tabuleiro.

Durante a colocação das aduelas no tramo a construir, as aduelas ficam suspensas pela lançadeira através de barras de suspensão. Com o decorrer do processo construtivo o peso das aduelas vai fazer com que ocorram deformações na lançadeira. Se estas deformações da lançadeira não forem compensadas irão causar desvios na geometria final do tabuleiro.

O peso de uma nova aduela (n+1) irá causar a deformação da lançadeira e consequentemente alterar a posição das aduelas assembladas anteriormente. Isto acontece ao longo de todo o processo de colocação das aduelas, logo, deve ser estudada a influência da colocação de uma nova aduela (n+1) nas aduelas já assembladas e a consequência disso nos esforços das barras de suspensão e nas tensões das interfaces de colagem das aduelas.

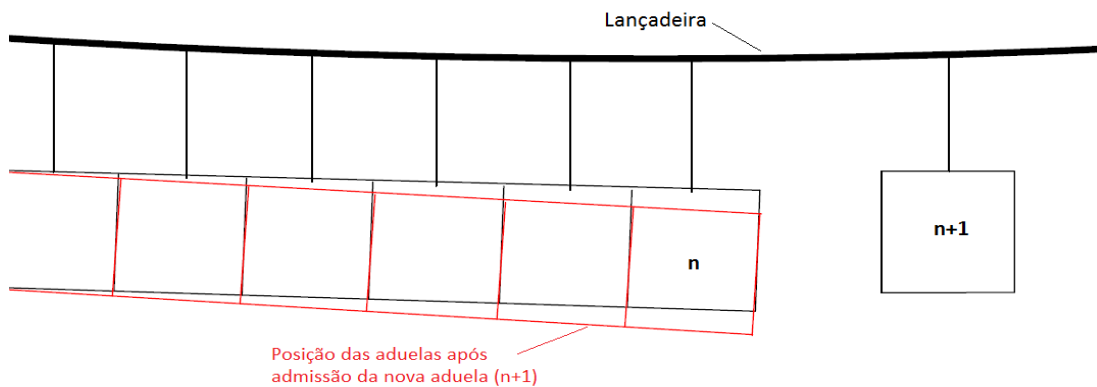


Fig. 4.23. – Admissão de uma nova aduela (n+1) na lançadeira

Com a colocação de uma nova aduela (n+1), o peso desta irá causar a deformação da lançadeira, logo, a posição das aduelas anteriores será alterada. O ajuste da posição da aduela (n+1) será limitado, uma vez que, esse ajuste tem de ser compatível com o encaixe na posição da aduela anterior (n). Assim, para que seja possível o encaixe da nova aduela (n+1) na aduela anterior (n) é necessário que a aduela (n+1) tenha a mesma cota na superfície de encaixe ($Z_n = Z_{n+1}$) e a mesma rotação ($\Theta_n = \Theta_{n+1}$) que a aduela (n) (Figura 4.24.).

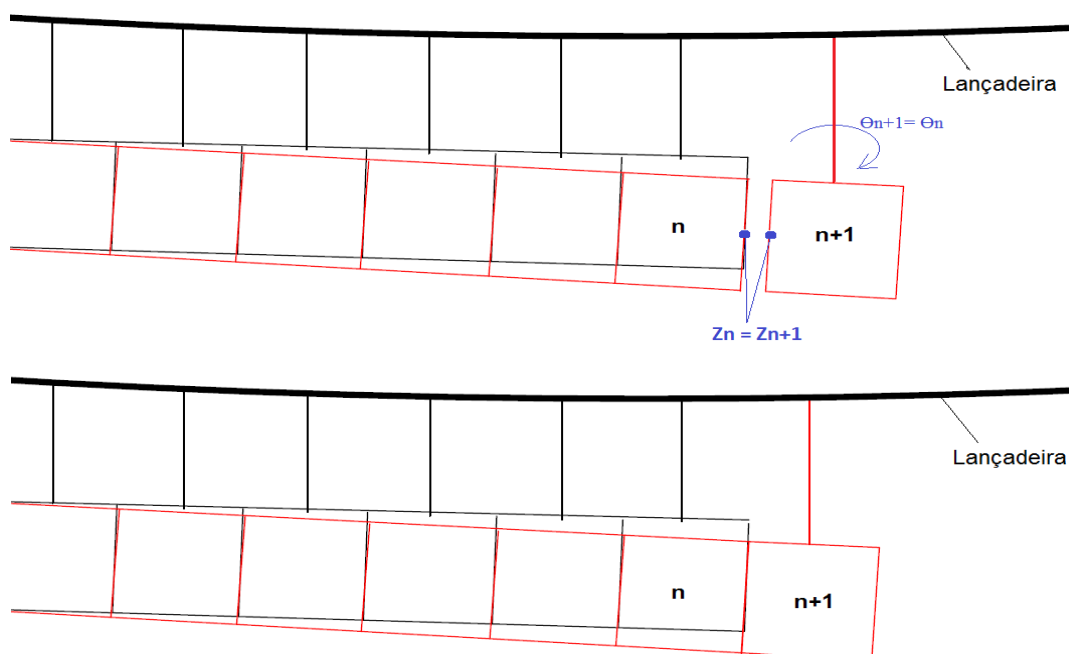


Fig. 4.24. – Ajuste da nova aduela (n+1) e encaixe na aduela (n)

Ao longo do processo construtivo, a colocação de novas aduelas aumenta a deformação da lançadeira o que leva a progressivos deslocamentos verticais das aduelas anteriormente colocadas, aumentando assim o desvio de posição altimétrica do tabuleiro.

Outro tipo de desvio que ocorre durante a colocação das aduelas deve-se a deformação das barras de suspensão das aduelas. Esta deformação é devida ao peso da aduela suspensa. No entanto, este desvio pode ser compensado com ajustes nas barras de suspensão no momento após a suspensão da aduela na lançadeira e antes do encaixe desta com a aduela anterior

O efeito da temperatura, mais precisamente o gradiente de temperatura, também poderá causar um desvio na geometria do tabuleiro. O gradiente de temperatura existe quando uma parte da estrutura tem uma temperatura diferente de uma outra parte. Isto ocorre, geralmente, quando a parte superior da aduela, que está exposta ao sol, aquece mais rapidamente que as almas e a parte inferior, que não estão diretamente expostas ao sol. As temperaturas podem facilmente atingir diferenças de 15 a 20°C (ASBI, 2008). Em consequência desta diferença de temperaturas, a parte superior da aduela expande (Δx) mas a parte inferior não, e assim, o tabuleiro tende a fletir. Este desvio origina uma alteração na geometria do tabuleiro que pode trazer problemas durante a sua construção.

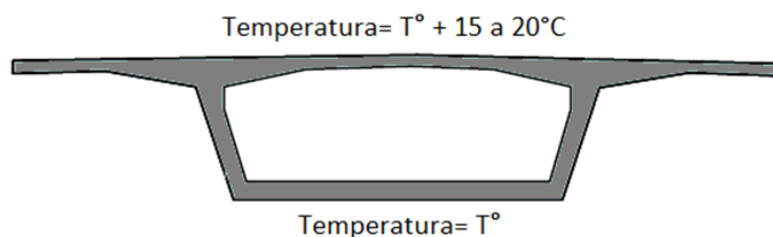


Fig. 4.25. – Diferenças de temperatura numa aduela

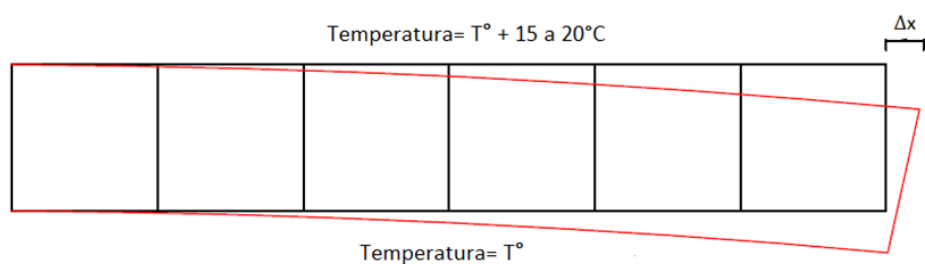


Fig. 4.26. – Alteração da geometria do tabuleiro devido ao efeito da temperatura

Este problema poderá ser mais preocupante no caso da construção de grande vão, com a lançadeira LG90, devido ao facto da junta de fecho ser feita a 1/5 do vão. Isto porque, no momento da betonagem da junta, o tabuleiro ainda suspenso pela lançadeira e a consola já construída podem sofrer desvios não esperados devido a este efeito da temperatura. Assim, a betonagem da junta de fecho deverá ser realizada no momento mais adequado, ou seja, quando este efeito da diferença de temperatura nas aduelas é menor.

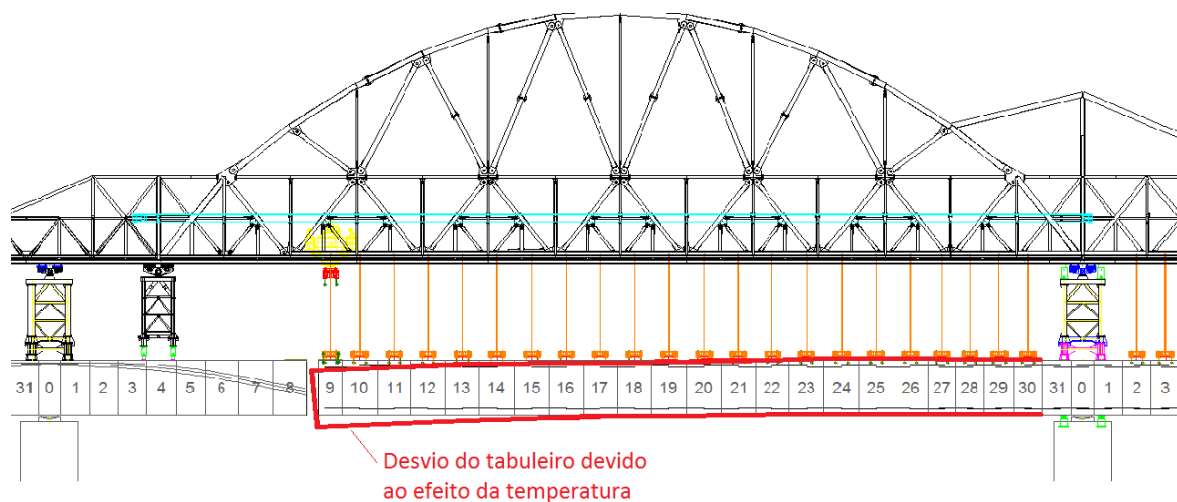


Fig. 4.27. – Desvio do tabuleiro na construção de grande vão

5

CONTROLO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS INERENTES AO MÉTODO CONSTRUTIVO

5.1. PRÉ-FABRICAÇÃO DAS ADUELAS

5.1.1. ASPETOS GERAIS

Na fase de pré-fabricação das aduelas, estas devem ser produzidas de acordo com uma determinada geometria para que quando instaladas na obra resultem na geometria final correta.

Um dos conceitos mais importantes na pré-fabricação das aduelas é a curva de betonagem. Esta curva de betonagem deverá ser geometricamente recreada na célula de betonagem, no caso de linha curta de fabrico, ou na cama de betonagem, no caso da linha longa de fabrico. Para a definição da curva de betonagem é necessário o conceito de contra-flecha estrutural. O plano de contra flechas é a diferença que se deve considerar entre o alinhamento teórico final da superestrutura e o traçado desta na fase de betonagem. Esta diferença visa compensar as deformações causadas pelo peso próprio da estrutura, pré-esforço e deformações diferidas no tempo (fluência e retração), tendo em conta as várias etapas construtivas e os seus efeitos. Geralmente os valores da contra-flecha são calculados de modo a que a rasante teórica resulte na posição intermédia entre as rasantes do tabuleiro no tempo inicial e a rasante após 10 anos da sua construção.

No processo de pré-fabricação com recurso a linha curta de fabrico o processo de controlo geométrico é muito complexo e deve ser feito de uma forma rigorosa e precisa. Neste método, os erros que ocorrem durante o processo de fabricação deverão ser corrigidos caso contrário o sucesso de todo o processo construtivo pode estar em causa. Para o processo de fabrico das aduelas é necessário o recurso a programas de controlo geométrico que tenham em conta o plano de contra-flechas, as curvas verticais e horizontais e possíveis erros que poderão ocorrer durante a betonagem das aduelas. Assim, para que a geometria final da superestrutura seja correta é essencial o recurso a um apertado e disciplinado controlo geométrico durante todo este processo.

No que diz respeito à pré-fabricação com recurso a linha longa de fabrico, o controlo geométrico é um processo de menor complexidade, uma vez que, a mesa de betonagem reproduz exatamente a curva de betonagem desejada para se obter as aduelas com a geometria correta (Barker, J.M., 1980, Hewson, N.R., 2003).

5.1.2. CONTROLO GEOMÉTRICO DURANTE A FABRICAÇÃO DAS ADUELAS COM O MÉTODO DA LINHA CURTA DE FABRICO

O controlo geométrico na fabricação das aduelas é muito importante uma vez que, como já referido, é nesta fase que é definido o traçado da superestrutura. Assim, é essencial um preciso controlo geométrico durante esta fase, uma vez que, a correção geométrica durante a instalação das aduelas é muito limitada e de difícil execução.

Na linha curta de fabrico, a definição geométrica é feita desde a primeira aduela sobre o pilar e consiste na betonagem sequencial de uma aduela contra a aduela anterior (contra molde), impondo uma orientação relativa nesta última de modo a obter a geometria desejada. Assim, para a obtenção de um alinhamento curvo vertical o procedimento necessário consiste na imposição de uma rotação no plano vertical da aduela de contra molde em relação à sua posição inicial.

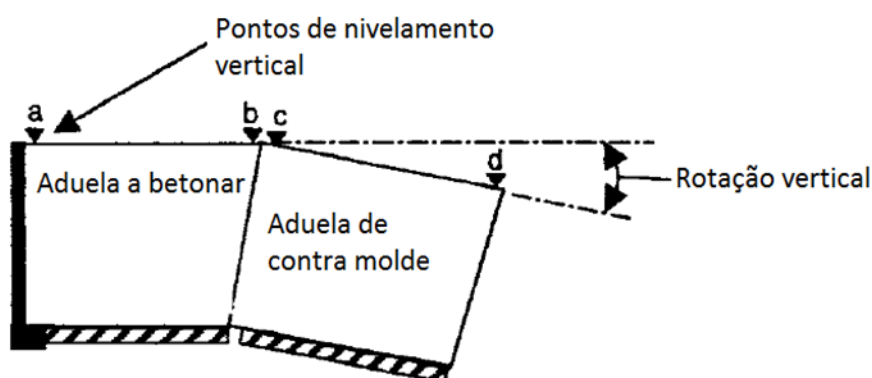


Fig. 5.1. – Ajuste da aduela de contra molde para definição de uma curvatura vertical (Hewson, N.R., 2003)

Para a obtenção de um alinhamento curvo horizontal o procedimento é o mesmo mas agora a rotação realiza-se no plano horizontal.

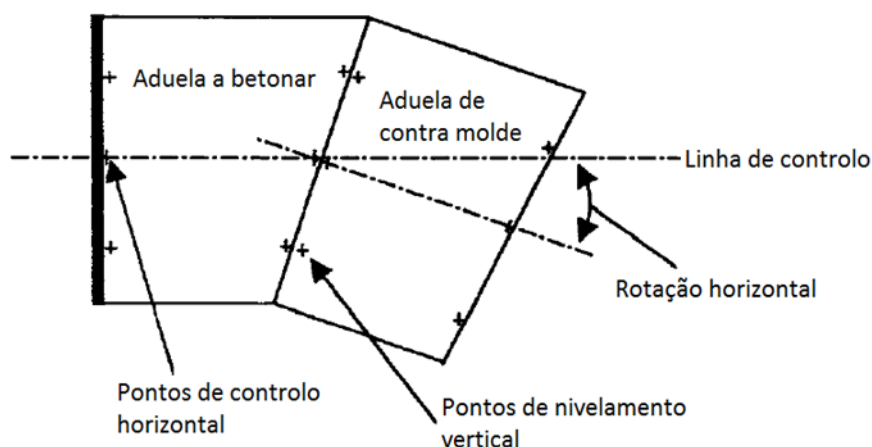


Fig. 5.2. – Ajuste da aduela de contra molde para definição de uma curvatura horizontal (Hewson, N.R., 2003)

O controlo da geometria das aduelas é feito topograficamente. Os dados são processados com recurso a um programa computacional que a partir dos dados do traçado teórico da ponte e da geometria da aduela fabricada anteriormente, determina a geometria a impor na nova aduela que se vai betonar. Assim, o tabuleiro irá aproximar-se o mais possível do traçado teórico.

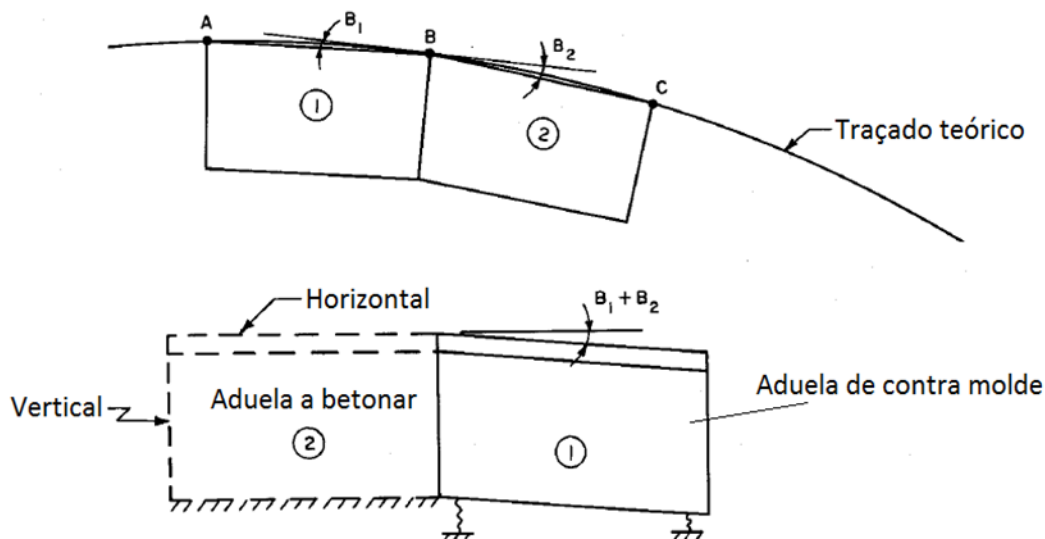


Fig. 5.3. – Posicionamento das aduelas para se obter a geometria desejada
(Barker, J.M., 1980)

Nas aduelas são estabelecidos 6 pontos de referência dos quais se retiram as coordenadas para o controlo geométrico. O alinhamento horizontal é controlado a partir de dois pontos que se encontram no centro da aduela na sua parte superior (fig. 5.2.). Uma linha permanente de controlo horizontal é estabelecida ao longo do eixo da célula de betonagem, por uma torre de controlo de um lado e por uma mira no outro. O alinhamento vertical é controlado por 4 pontos colocados sobre as almas (fig. 5.2.) e, através de equipamentos de nivelamento é possível obter uma medição precisa do nível de cada um destes pontos. O alinhamento vertical de cada alma é monitorizado de modo a controlar a inclinação transversal e o perfil longitudinal do tabuleiro (Hewson, N.R., 2003). O controlo geométrico deverá ser realizado primeiro em alçado e só depois em planta, uma vez que, os movimentos em alçado produzem alterações em planta. Já os movimentos em planta não produzem qualquer tipo alteração nas cotas dos pontos de controlo em alçado.

No início do processo de controlo geométrico as coordenadas dos 6 pontos de referência são pré-calculadas e gravadas na memória do sistema. O posicionamento da aduela de contra molde é então definido pela torre de controlo mais próxima que transmite a informação necessária para os ajustes que os macacos hidráulicos instalados na base da aduela terão de realizar. Este processo de orientação da aduela de contra molde deverá ser observado no mínimo por duas estações de controlo de modo a evitar possíveis desvios e para verificar a precisão dos instrumentos.

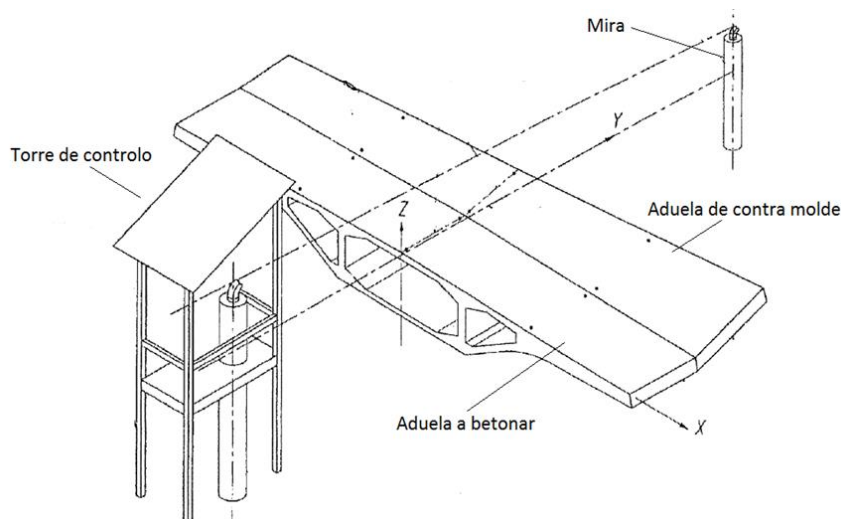


Fig. 5.4. – Esquema do processo de controlo geométrico

Durante o processo de pré-fabricação poderão ocorrer desvios na geometria das aduelas em relação à geometria teórica desejada. Este desvio poderá ocorrer devido a um erro no posicionamento da aduela de contra molde ou até mesmo devido a ações térmicas, durante a betonagem, que fazem com que ocorram tensões secundárias. Se estes desvios na geometria não forem considerados poderão aparecer graves problemas no alinhamento da superestrutura. Um erro de milímetros durante este processo irá refletir-se de forma amplificada ao longo de toda a superestrutura. Assim sendo, é importante efetuar um controlo geométrico mais apertado de modo a repartir os erros geométricos, na fabricação das aduelas seguintes, e assim recuperar a geometria desejada. É importante que estes erros sejam determinados numa fase inicial para que sejam corrigidos mais facilmente. Para isso é necessária uma verificação geométrica sistemática e frequente durante a fabricação (Hewson, N.R., 2003, Kumar, K. [et al.], 2008)

Com o atual desenvolvimento de tecnologias de automação, todo o processo de fabricação pode ser automatizado através do uso de medições a laser, computação automática de desvios geométricos e de um mecanismo de aplicação dos movimentos de ajuste. A posição dos pontos de referência é constantemente monitorizada através de um sistema de laser que envia a informação para um processador que por sua vez calcula o desvio em tempo real e comanda o mecanismo de ajuste para corrigir o erro (Kumar, K. [et al.], 2008).

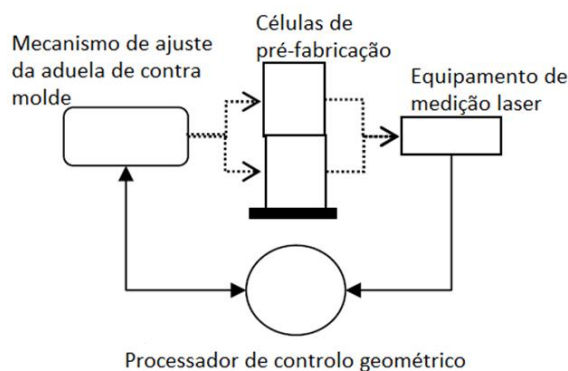


Fig. 5.5. – Esquema do processo de controlo geométrico automatizado (Kumar, K. [et al.], 2008)

Toda a lógica do processo de controlo geométrico, para a identificação e correção de um desvio na geometria de uma aduela, requer que sejam seguidos alguns procedimentos. Este inicia-se com o cálculo das coordenadas teóricas de betonagem da aduela (n). Após a betonagem da aduela (n) procede-se à medição das atuais coordenadas de betonagem de modo a calcular o desvio que ocorreu no processo de betonagem da aduela (n). Posto isto, é calculada a correção a ser efetuada na betonagem da nova aduela (n+1) que tem como contra molde a aduela (n). Assim, a aduela de contra molde (n) deve ser ajustada de modo a que no processo de betonagem da aduela (n+1) se consiga compensar, parcial ou totalmente, o erro ocorrido na betonagem da aduela (n). Caso não seja possível corrigir a totalidade do erro na betonagem da aduela (n+1), o que resta deste será corrigido na betonagem das aduelas seguintes, até se atingir o alinhamento desejado.

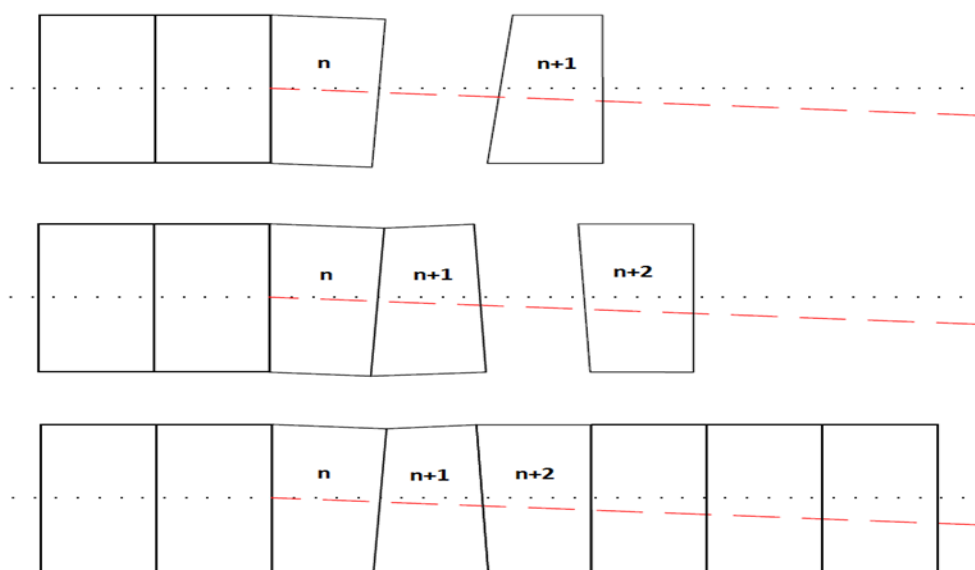


Fig. 5.6. – Alteração da geometria das aduelas (n+1) e (n+2) para corrigir o erro criado pela aduela (n)

5.2. INSTALAÇÃO DAS ADUELAS

Para o processo de controlo geométrico durante a fase de instalação das aduelas, é essencial utilizar toda a informação recolhida sobre a geometria das aduelas no final da pré-fabricação. A correta construção da ponte está dependente da utilização de um método de controlo e verificação da geometria do tabuleiro no que diz respeito a elevações e alinhamentos. Para estes controlos pode-se adotar métodos numéricos ou gráficos, sendo que é importante estabelecer as etapas chave para a realização desses controlos.

O procedimento base do controlo passa por calcular a diferença que se verifica num determinado ponto entre a cota (alçado) e coordenadas (planta) reais, obtidas por métodos topográficos, e os mesmos parâmetros teóricos. Estas cotas e coordenadas teóricas dos pontos são calculadas a partir dos dados finais do controlo geométrico realizado na fase de pré-fabricação das aduelas. Como acontece na fase de pré-fabricação das aduelas, também na fase de instalação o alinhamento teórico deve ter em conta o efeito das contra-flechas impostas, de maneira a que se realize uma correta determinação das cotas e coordenadas teóricas que se deve obter nos vários momentos de controlo topográfico durante a instalação das aduelas (ASBI, 2008, Tarrataca, T.J.S., 2009).

Se durante a instalação das aduelas os alinhamentos desejados não estiverem a ser seguidos, deverão ser adotadas medidas para correção do desvio, e assim, assegurar que o tabuleiro é construído segundo os alinhamentos desejados. No entanto, as medidas corretivas nesta fase são de difícil implementação e apenas permitem pequenos ajustes. As correções podem ser feitas através dos cilindros de ajuste geométrico posicionados nos apoios definitivos, alterações na junta de betonagem ou variações de forças nas barras de suspensão. Este último caso deve ser muito controlado pois este tipo de procedimento poderá resultar em esforços no tabuleiro que poderão por em causa a integridade da colagem das juntas com resina epoxi. Uma outra medida possível seria o ajuste com a aplicação ou redução da resina epoxi aplicada nas juntas entre aduelas. No entanto, esta medida só deve ser utilizada em último recurso uma vez que estas alterações poderão por em causa o correto comportamento da estrutura (ASBI, 2008). Outro procedimento possível seria a colocação de tacos de resina epoxi entre as chaves de corte das juntas. Os tacos de resina são colocados nas chaves de corte superiores ou inferiores, de modo a corrigir o alinhamento (Carril, T., 2006).

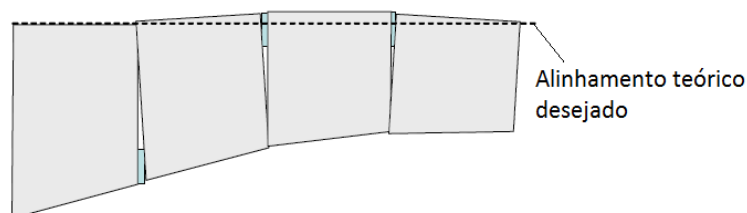


Fig. 5.7. – Ajuste com tacos de resina epoxi
(Adaptado de Carril, T., 2006)

5.3. POSICIONAMENTO DA ADUELA 0

De modo a que o posicionamento da aduela 0 sobre o pilar seja feito com a maior precisão possível, durante o seu fabrico são colocados mais 2 pontos de controlo para além dos 6 pontos comuns em todas as aduelas. Estes 2 pontos extra formam uma linha transversal de controlo horizontal na superfície da aduela 0. O procedimento normal consiste em determinar uma linha paralela à cofragem fixa e colocá-la no centro da aduela com os pontos de controlo o mais próximo possível da extremidade da aduela. Sendo o comprimento desta linha maior que o comprimento da linha longitudinal de controlo horizontal, é possível fazer um alinhamento da aduela com maior precisão.

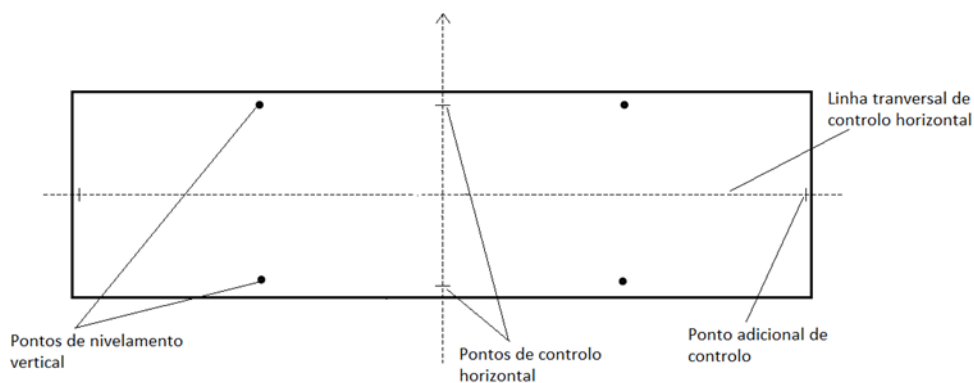


Fig. 5.8. – Pontos para controlo de posicionamento da aduela 0

É necessário que esta linha seja observável na ponte, quer a partir de cima ou a partir do solo. Neste ultimo caso, a linha deve ser marcada nas faces das consolas, e duas estações de controlo devem ser montadas no solo, uma de cada lado do pilar. Assim, durante o posicionamento da aduela 0, a sua posição pode ser medida pelas estações de controlo e comparada com a posição teórica desejada. Caso a posição da aduela não esteja de acordo com a posição desejada são feitos os ajustes necessários nos macacos hidráulicos, posicionados entre o pilar e a aduela, para que seja corrigida a sua posição(ASBI, 2008).

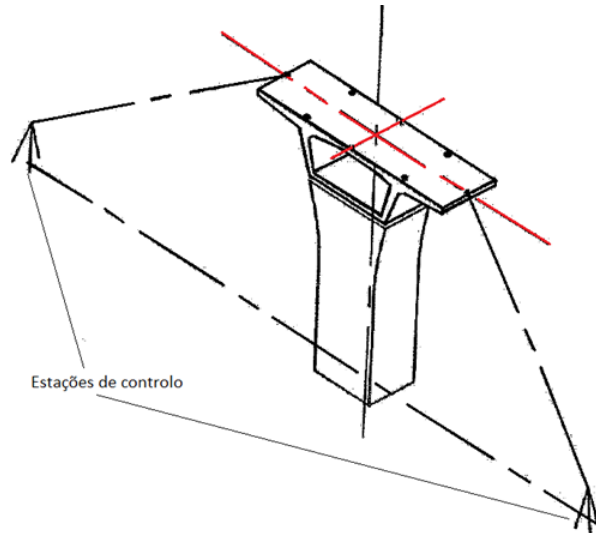


Fig. 5.9. – Controlo do posicionamento da aduela 0 a partir de estações de controlo no solo
(Adaptado de ASBI, 2008)

5.4. COMPORTAMENTO DO EQUIPAMENTO CONSTRUTIVO

5.4.1. SIMULAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO

Na análise do processo construtivo será tido em conta a deformação da lançadeira devido ao peso de cada aduela a ser assemblada. O peso de uma nova aduela irá causar a deformação da lançadeira e consequentemente alterar a posição das aduelas assembladas anteriormente. Isto acontece ao longo de todo o processo de colocação das aduelas logo o objetivo é estudar o desvio na posição altimétrica associada a este procedimento.

5.4.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO

A colocação de uma nova aduela ($n+1$) irá causar a deformação da lançadeira o que implica uma alteração das cotas das aduelas assembladas anteriormente. O que acontece é uma rotação do tabuleiro já construído (Θ_n^{n+1}). A rotação do tabuleiro é determinada pela seguinte equação:

$$\Theta_n^{n+1} = \frac{Z_n}{X} \quad (5.1)$$

- Onde: Θ_n^{n+1} ➤ Rotação do tabuleiro devido à deformação da lançadeira causada pela aduela ($n+1$)
 Z_n ➤ Cota da aduela (n) após a admissão da aduela ($n+1$) [m]
 X ➤ Distância da aduela (n) à aduela 0 [m]

A aduela (n+1) será ajustada de modo a encaixar na aduela (n). A cota da aduela (n+1), após o encaixe na aduela (n), é determinada pela seguinte equação:

$$Z_{n+1} = \Theta_n^{n+1} \times (X+Y) \quad (5.2)$$

- Onde: Z_{n+1} ➤ Cota da aduela (n+1) imediatamente após o seu posicionamento [m]
 Θ_n^{n+1} ➤ Rotação do tabuleiro devido à deformação da lançadeira causada pela aduela (n+1)
 X ➤ Distância da aduela (n) à aduela 0 [m]
 Y ➤ Distância da aduela (n) à aduela (n+1) [m]

Como a aduela 0 é colocada sobre o pilar, considera-se que esta ficará sempre à cota 0 ao longo de todo o processo construtivo. Um esquema do procedimento de cálculo poderá ser visto na fig. 5.10.

A cota final a que as aduelas ficarão posicionadas é determinada pela soma dos deslocamentos verticais de cada aduela ao longo do processo construtivo. Estas variações de cota das aduelas ocorrem devido à gradual deformação da lançadeira sempre que se coloca uma nova aduela.

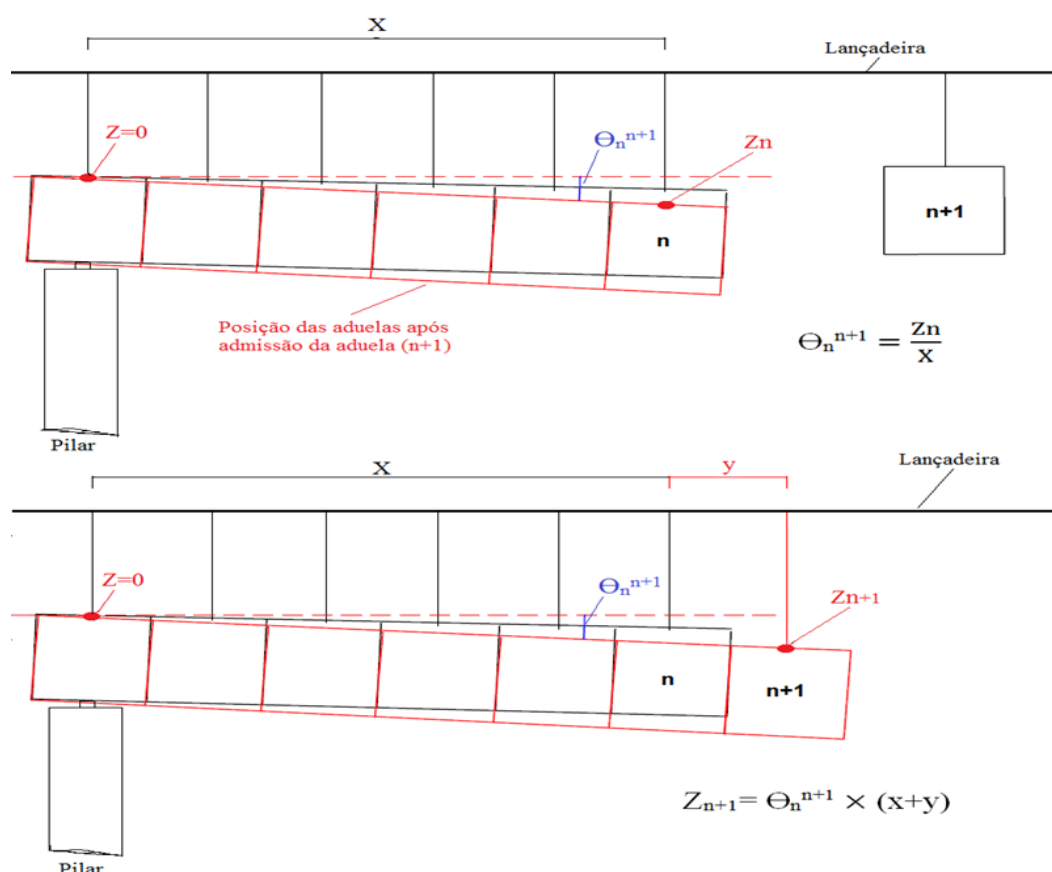


Fig. 5.10. – Procedimento de cálculo da posição das aduelas ao longo do processo construtivo

5.4.2.1. Modelos de cálculo

No estudo da construção tramo a tramo de médio vão, será analisado o processo construtivo de um vão de 50 metros utilizando a lançaadeira LG50. Para fazer a simulação do processo construtivo foi utilizado um modelo Robot da lançaadeira LG50. No modelo, o peso de cada aduela é simulado por duas cargas aplicadas na lançaadeira, no local onde se fixam as barras de suspensão. Neste caso em estudo, foi considerado a construção de um vão reto em que cada uma das duas cargas a aplicar corresponde a metade do peso da aduela. O peso das aduelas sobre os pilares é de, aproximadamente, 92.7ton e o peso médio das restantes aduelas é de 90ton.

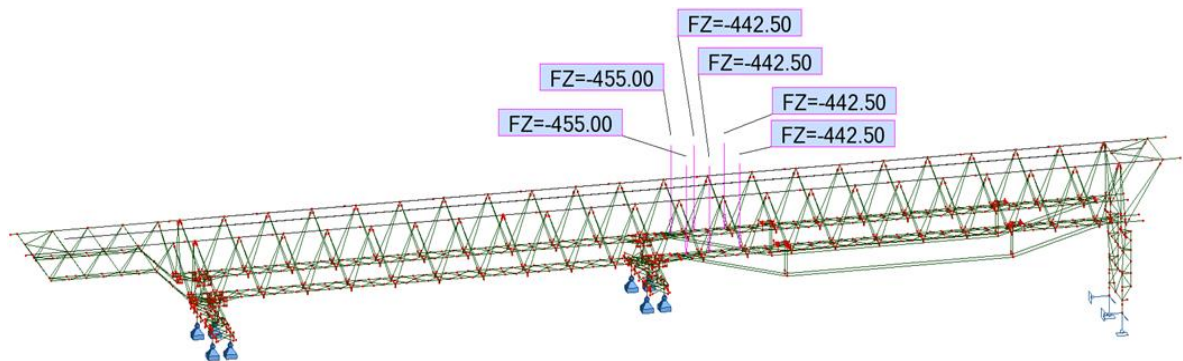


Fig. 5.11. – Modelo Robot da lançaadeira LG50 carregada com as 3 primeiras aduelas

No estudo da construção tramo a tramo de grande vão será analisado o processo construtivo de um vão de aproximadamente 90 metros utilizando para isso a lançaadeira LG90. Para a realização do estudo da simulação do processo construtivo utilizou-se um modelo Robot da lançaadeira LG90. O peso de cada aduela é simulado por duas cargas, sendo estas aplicadas no modelo da lançaadeira nos pontos onde se fixam as barras de suspensão. Para o estudo foi considerado a construção de um vão reto em que o peso médio das aduelas é de aproximadamente 112ton.

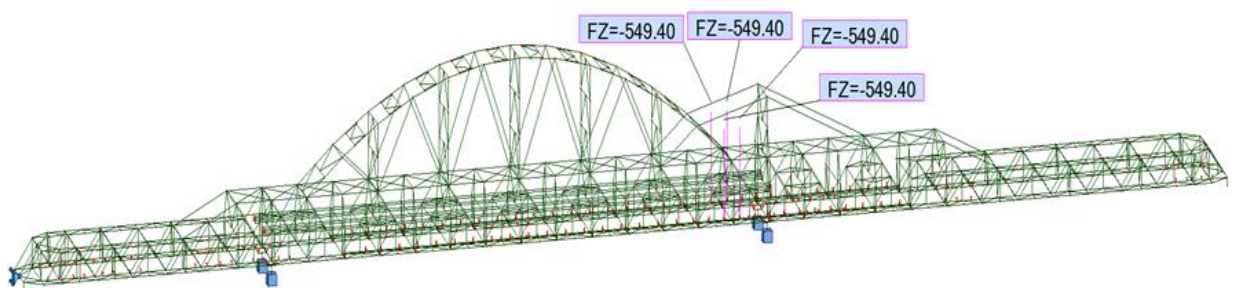


Fig. 5.12. – Modelo Robot da lançaadeira LG90 carregada com as 2 primeiras aduelas

5.4.2.2. Parâmetros do sistema OPS

O sistema OPS é utilizado para a compensação da deformação da lançadeira na colocação das aduelas não pré-suspensas. O controlo do OPS é realizado pela medição da flecha devido à deformação da lançadeira. Para o cálculo da flecha são necessários os valores da deformação vertical ocorrida em 3 pontos de leitura de dados do sistema OPS. Estes pontos são colocados nos alinhamentos dos apoios dos pórticos (pontos teoricamente fixos verticalmente) e a meio vão (ponto de maior amplitude de variação de flecha).

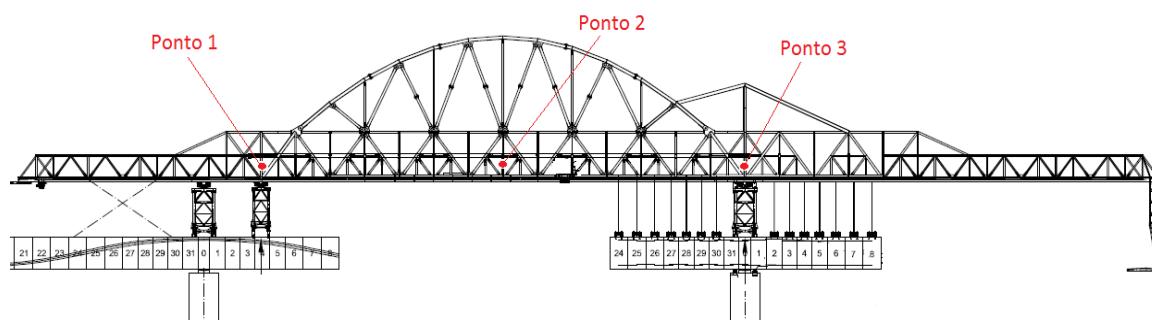


Fig. 5.13. – Pontos de controlo do sistema OPS na lançadeira LG90

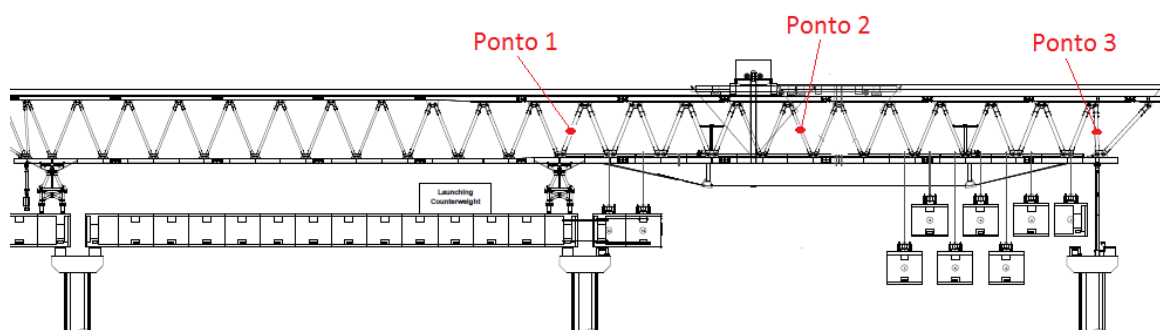


Fig. 5.14. – Pontos de controlo do sistema OPS na lançadeira LG50

O valor da flecha é determinado pela seguinte equação:

$$\text{flecha} = \text{def 2} - \frac{(\text{def 1} + \text{def 3})}{2} \quad (5.3)$$

Onde: def 1 ➤ Deformação vertical no ponto 1

def 2 ➤ Deformação vertical no ponto 2

def 3 ➤ Deformação vertical no ponto 3

Na construção com a lançaadeira LG90, o sistema OPS é ativado na colocação da aduela 23. A deformação da lançaadeira provocada pela admissão da aduela 23 deve ser compensada pelo sistema. Com esta compensação não haverá rotação do troço do tabuleiro já construído, melhorando assim o posicionamento da aduela 23. O valor da flecha associado à compensação do posicionamento da aduela 23 é tido como o valor de referência de flecha para a colocação das restantes aduelas. Assim, à medida que se suspende mais uma aduela, a lançaadeira deforma-se, os sensores do sistema vão detetar o incremento na flecha e o atuador OPS atua até que a flecha corresponda à referência inicial. Este procedimento será repetido até se atingir a força máxima no atuador OPS. Nesta lançaadeira a capacidade máxima do atuador OPS é fixada em 1000ton.

Na construção com a lançaadeira LG50, o sistema OPS é ativado na colocação da aduela 2. O valor de referência de flecha corresponde ao carregamento da lançaadeira com as aduelas pré-suspensas e com a aduela 0 e 1, ou seja, o carregamento que precede à colocação da aduela 2. À medida que se suspende mais uma aduela o incremento de flecha é medido pelos sensores do sistema e o atuador OPS atua até que a flecha corresponda à referência inicial. Este procedimento é repetido até se atingir a capacidade máxima do atuador OPS. Para esta lançaadeira a força máxima do atuador foi fixada em 500ton.

5.4.3. CONSTRUÇÃO DE MÉDIO VÃO COM A LANÇADEIRA LG50

5.4.3.1. Simulação do processo construtivo sem qualquer tipo de compensação do efeito da deformação da lançaadeira

No início do processo construtivo, com a colocação das duas primeiras aduelas, a deformação da lançaadeira pode ser compensada com ajustes das barras de suspensão. Isto é possível pois trata-se de um sistema estrutural isostático e compensar a posição altimétrica com ajustes nas barras de suspensão não resulta em qualquer esforço interno.

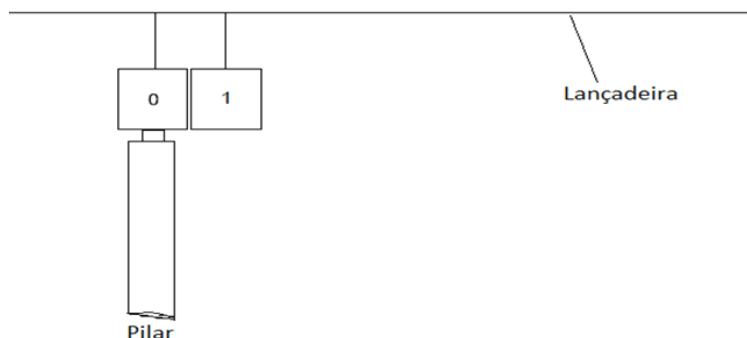


Fig. 5.15. – Colocação das duas primeiras aduelas

A partir da colocação da aduela 2 a deformação da lançaadeira já não pode ser compensada com ajustes nas barras de suspensão pois com três ou mais barras o sistema estrutural é hiperestático. Isso significa que ajustar um alinhamento de suspensão resulta numa redistribuição de esforços nas barras de suspensão dos restantes alinhamentos. Assim, à medida que se suspende mais uma aduela a lançaadeira irá deformar-se alterando a posição das aduelas já colocadas e consequentemente aumenta o desvio de posição altimétrica do tabuleiro.

No final do processo construtivo estima-se que as aduelas fiquem posicionadas a uma cota (Z) indicada no gráfico figura 5.16.

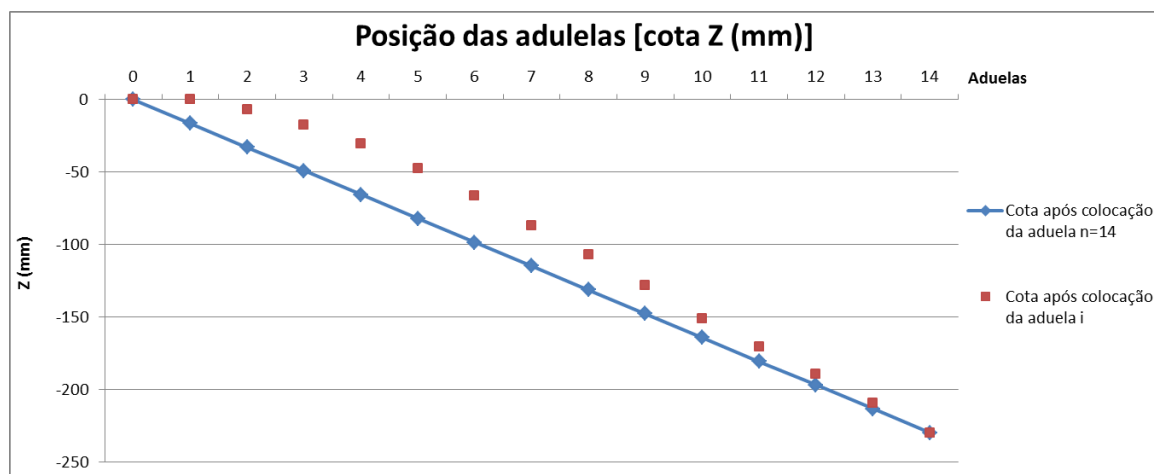


Fig. 5.16. – Posição das aduelas no final do processo construtivo

Com esta simulação do processo construtivo é possível fazer uma estimativa do desvio na posição altimétrica do tabuleiro. Assim, no estudo realizado a cota da última aduela a ser posicionada (aduela 14) assume o valor de -229.67mm.

Importa referir que nesta simulação o tabuleiro não foi modelado, logo não é considerada a rigidez do tabuleiro.

5.4.3.2. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial

Neste caso, o processo construtivo inicia-se com o pré-carregamento parcial da lançadeira. O pré-carregamento consiste na suspensão provisória das 7 últimas aduelas a serem colocadas. Após a pré-suspensão destas aduelas, dá-se início à colocação das primeiras aduelas do vão. Estando as 8 primeiras aduelas colocadas, as aduelas pré-suspensas são reposicionadas na sua posição final.

A pré-suspensão de parte das aduelas do vão faz com que a lançadeira se deforme antes do posicionamento final das aduelas pré-suspensas. Assim, na colocação das aduelas pré-suspensas na sua posição final não irão ocorrer deformações significativas da lançadeira. Durante o reposicionamento das aduelas pré-suspensas, as aduelas previamente colocadas apenas sofrerão pequenas variações da sua posição, diminuindo assim o desvio de posição altimétrica do tabuleiro. Este desvio é sobretudo devido à deformação da lançadeira durante a colocação das primeiras 8 aduelas do vão, sendo que no reposicionamento das aduelas pré-suspensas a deformação da lançadeira é, como já referido, muito reduzida. A pequena deformação que ainda ocorre durante o reposicionamento deve-se ao facto de que as aduelas quando são pré-suspensas estão mais próximas do apoio, logo a deformação da lançadeira será ligeiramente menor do que quando são colocadas na sua posição final.

A pré-suspensão de mais aduelas poderia trazer vantagens em relação à diminuição do desvio de posição altimétrica do tabuleiro. No entanto, quanto mais aduelas forem pré-suspensas mais demorado será o processo construtivo. Assim, devem ser adotadas medidas adicionais para a compensação da deformação da lançadeira.

Após a colocação de todas as aduelas, estima-se que as cotas (Z) a que estas ficarão sejam as indicadas no gráfico da figura 5.17.

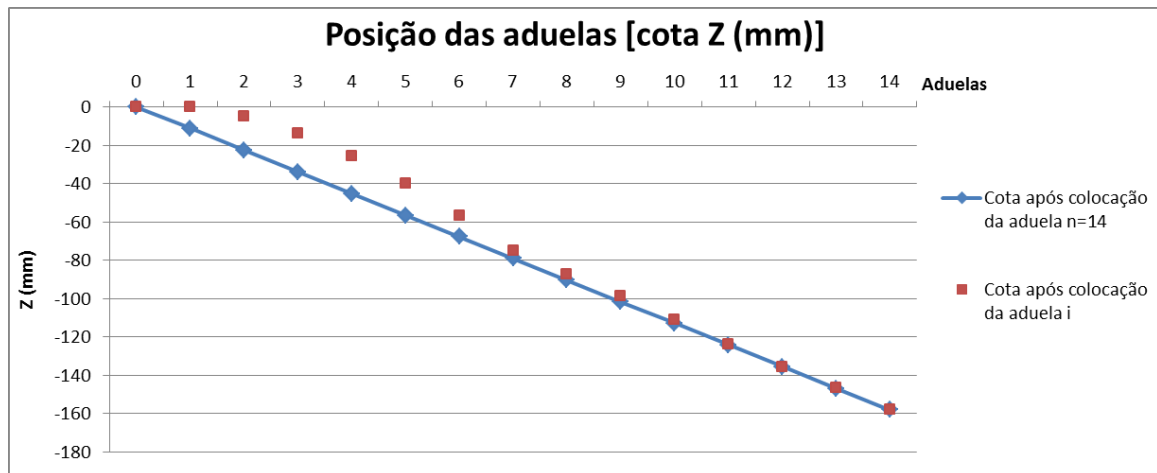


Fig. 5.17. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial

No que diz respeito às aduelas que são pré-suspensas, as cotas imediatamente após o seu posicionamento e as cotas no final do processo construtivo estão muito próximas. Isto demonstra que a pré-suspensão das aduelas foi eficiente na compensação da deformação da lançadeira durante o posicionamento final destas aduelas. No estudo realizado a cota da aduela 14, no final do procedimento, assume um valor de -158.21mm.

5.4.3.3. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial e ao sistema OPS

O processo construtivo é exatamente igual ao processo construtivo que pressupõe apenas pré-suspensão de aduelas, a única diferença está no facto de se utilizar o sistema OPS para compensar a deformação da lançadeira e consequentemente diminuir o desvio de posição altimétrica do tabuleiro durante a construção do tabuleiro. Prevê-se que após a montagem das primeiras duas aduelas na posição correta, o sistema OPS será responsável pela compensação da deformação da lançadeira provocada pelo posicionamento das restantes 6 aduelas (não pré-suspensas) e que a pré-suspensão compense a deformação da lançadeira provocada pelo posicionamento das restantes aduelas.

Chegado ao fim do processo construtivo, estima-se que as aduelas ficarão posicionadas com cota (Z) indicada no gráfico da figura 5.18.

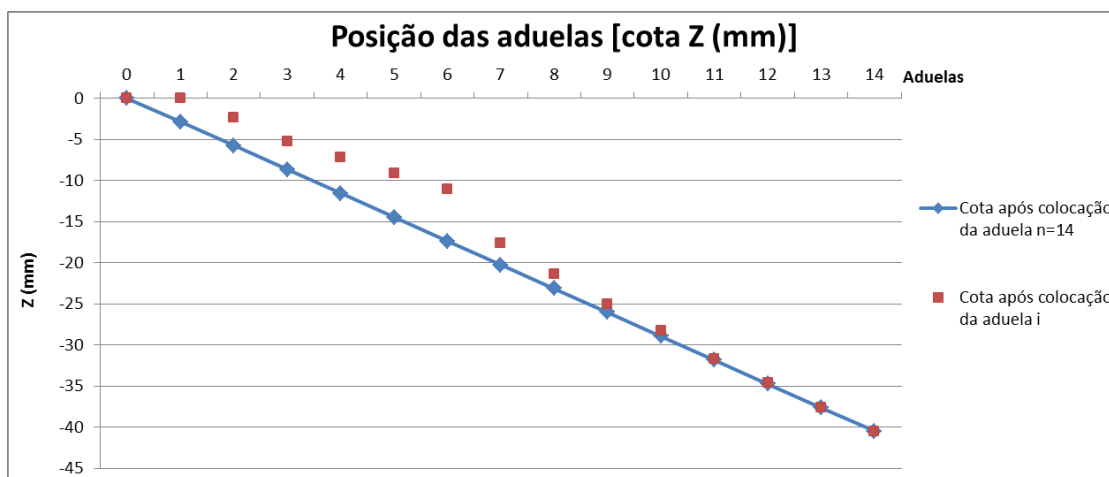


Fig. 5.18. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial e OPS

No caso em estudo é possível compensar a deformação com recurso ao sistema OPS até ao posicionamento da aduela 6. Uma vez atingido o limite do atuador OPS no posicionamento da aduela 7, só é possível compensar uma pequena parte da deformação. Devido a isto, pela análise do gráfico da figura 5.15., é possível verificar que na colocação da aduela 7 ocorre uma rotação acentuada do tabuleiro. O atuador OPS ficou com um curso de 190mm e com uma força de 495ton. No que diz respeito à pré-suspensão esta mostra ser eficiente. No final do procedimento, a cota aduela 14 assume um valor de -40.51mm.

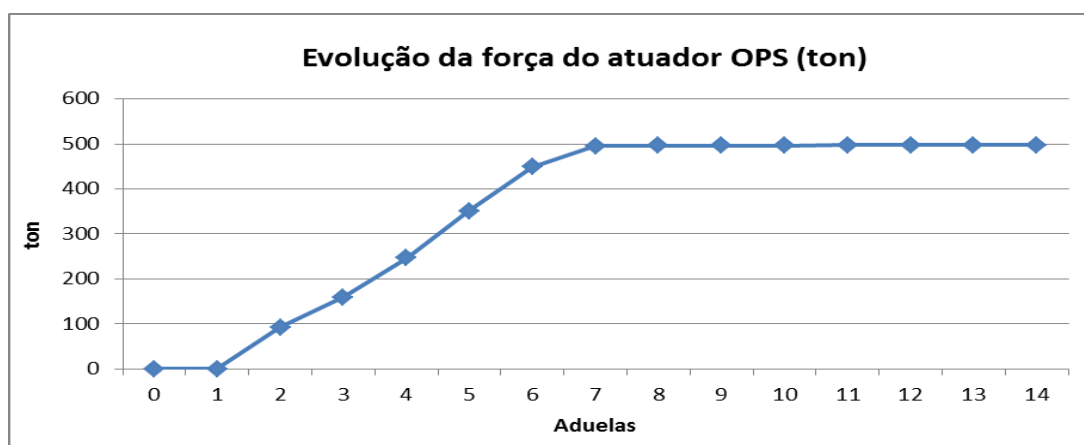


Fig. 5.19. – Evolução da força do atuador OPS ao longo do processo construtivo

5.4.3.4. Correção da posição do tabuleiro no final do processo com recurso aos cilindros de ajuste

No final da construção do tabuleiro, após todas as aduelas terem sido colocadas, a posição das aduelas ainda não é a desejada. Logo, para se obter a geometria final desejada procede-se a alguns ajustes nos cilindros de ajuste posicionados sobre os pilares.

Com ajustes nos cilindros dianteiros de ajuste, colocados sobre o pilar dianteiro, é possível corrigir a posição altimétrica do tabuleiro. No entanto, estes ajustes só poderão ser feitos após se libertar a lançadeira.

No final do processo construtivo as aduelas estão coladas e para se garantir que a colagem é eficiente não deve haver abertura das juntas, resultante da descompressão das respetivas interfaces. Assim, para se garantir que não há descompressão nas juntas, os cilindros de ajuste traseiro e dianteiro são colocados em carga mínima e em seguida é aplicado parte do pré-esforço no tabuleiro. Posto isto, sobe-se o tabuleiro com os cilindros de ajuste para se libertar a lançadeira. Estando a lançadeira completamente liberta do tabuleiro, é possível ajustar a posição altimétrica do tabuleiro e garantir a sua posição final sobre os apoios nos pilares. Este ajuste da posição altimétrica poderá ser feito com os cilindros dianteiros de ajuste, com estes a elevarem o tabuleiro até a posição desejada.

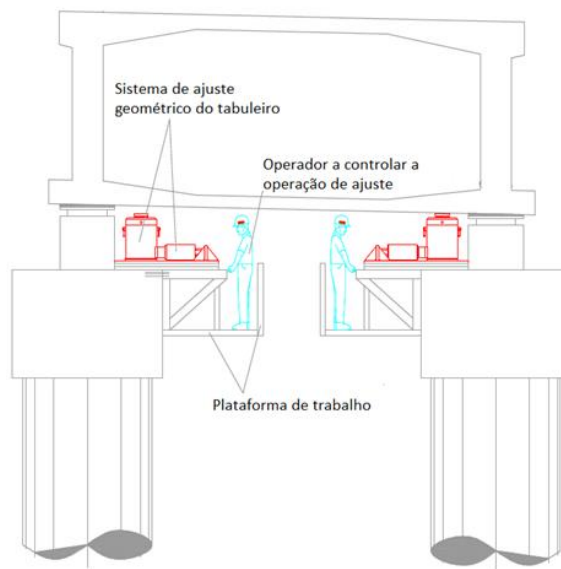


Fig. 5.20. – Sistema de ajuste geométrico do tabuleiro
(Adaptado de BERD, 2013a)

5.4.3.5. Comparação dos resultados obtidos

Numa comparação dos resultados apresentados, pode verificar-se que, do processo construtivo simples para o processo com pré-suspensão, houve uma redução do desvio de cerca de 31%. Em relação à comparação do processo construtivo com pré-suspensão e o processo com pré-suspensão e com OPS, a redução do desvio foi de, aproximadamente, 74%. Se a comparação for feita entre o processo construtivo simples e o processo com pré-suspensão e com OPS a redução do desvio é de, aproximadamente, 82%. O gráfico da figura 5.20. mostra a posição final das aduelas para cada um dos processos construtivos.

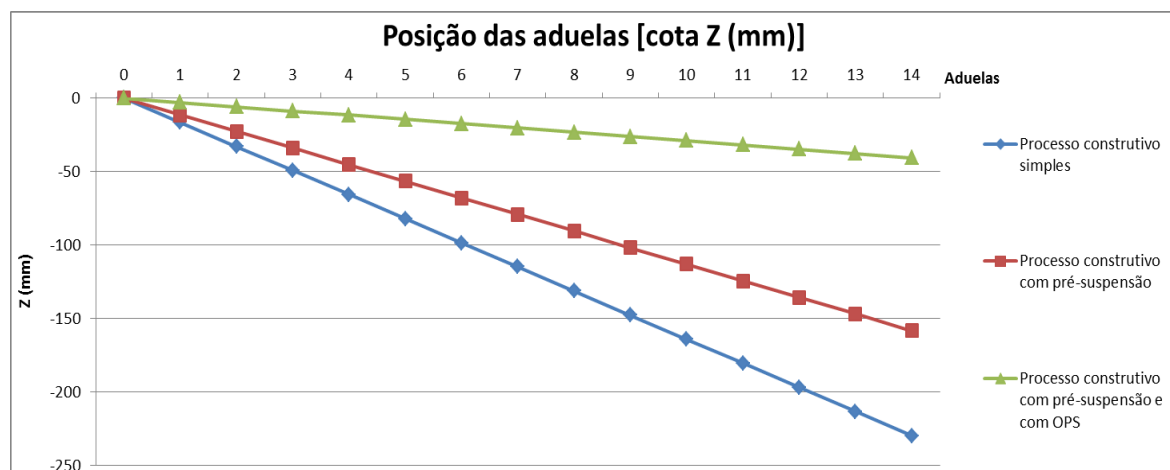


Fig. 5.21. – Comparação dos resultados obtidos

5.4.4. CONSTRUÇÃO DE GRANDE VÃO COM A LANÇADEIRA LG90

5.4.4.1. Simulação do processo construtivo sem qualquer tipo de compensação do efeito da deformação da lançadeira

Uma vez que as aduelas sobre o pilar (aduela 31, 0 e 1) já foram colocadas antes do posicionamento final da lançadeira, o processo construtivo inicia-se com a colocação da aduela 30. Como a aduela 30 está desligada das aduelas do pilar, a deformação da lançadeira, devido à aduela 30 e 29, pode ser compensada com ajustes nas barras de suspensão. Isto é possível pois trata-se de um sistema estrutural isostático e compensar a posição altimétrica com ajustes nas barras de suspensão não resulta em qualquer esforço interno. A partir da colocação da aduela 28 a deformação da lançadeira já não pode ser compensada com ajustes nas barras de suspensão pois trata-se de um sistema estrutural hiperestático. Assim, qualquer ajuste num alinhamento de suspensão resulta numa redistribuição de esforços nas barras de suspensão dos restantes alinhamentos.

No final da colocação de todas as aduelas, estima-se que estas fiquem posicionadas a uma cota (Z) indicada no gráfico da figura. 5.21.

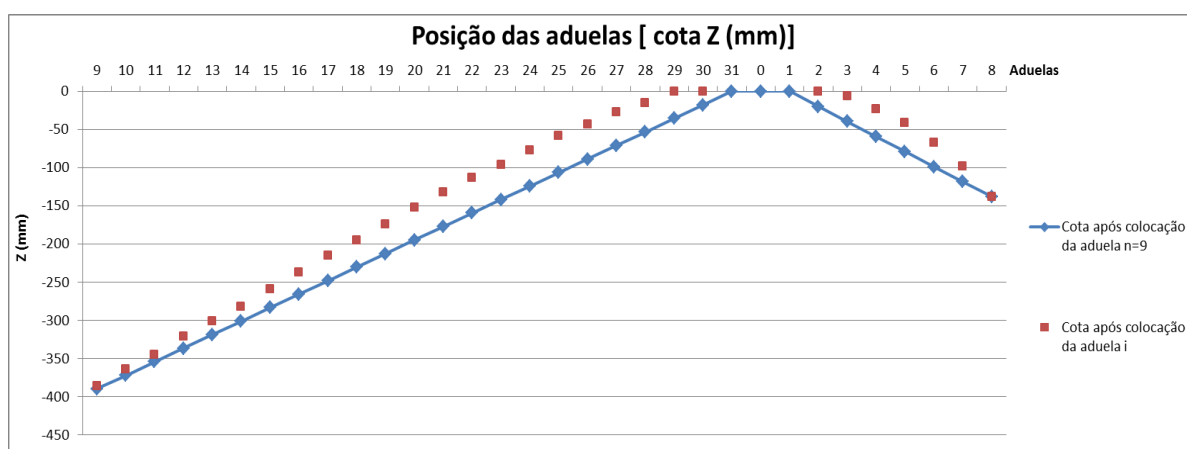


Fig. 5.22. – Posição das aduelas no final do processo construtivo

Importa referir que nesta simulação do processo construtivo o tabuleiro não foi modelado, logo não é considerada a rigidez do tabuleiro.

No final do processo construtivo a cota da ultima aduela do vão (aduela 9) assume o valor de -389.48mm. A cota da última aduela do vão seguinte (aduela 8) assume o valor de -137.83mm.

5.4.4.2. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial

Para este processo construtivo com pré-carregamento da lançadeira foram pré-suspensas as 7 primeiras aduelas do vão (aduelas 30 a 24) e as 7 primeiras aduelas do vão seguinte (aduelas 2 a 8). A aduela 30 foi pré-suspensa na sua posição final e as restantes aduelas foram pré-suspensas com um afastamento entre elas de 30cm. Assim, aquando do posicionamento destas aduelas na sua posição final, a deformação da lançadeira será praticamente nula, uma vez que, as aduelas foram pré-suspensas numa posição muito próxima da sua posição final. O processo é idêntico para as aduelas do vão seguinte.

Assim, no final do posicionamento de todas as aduelas, estima-se que as aduelas ficarão posicionadas a uma cota (Z) indicada no gráfico da figura 5.22.

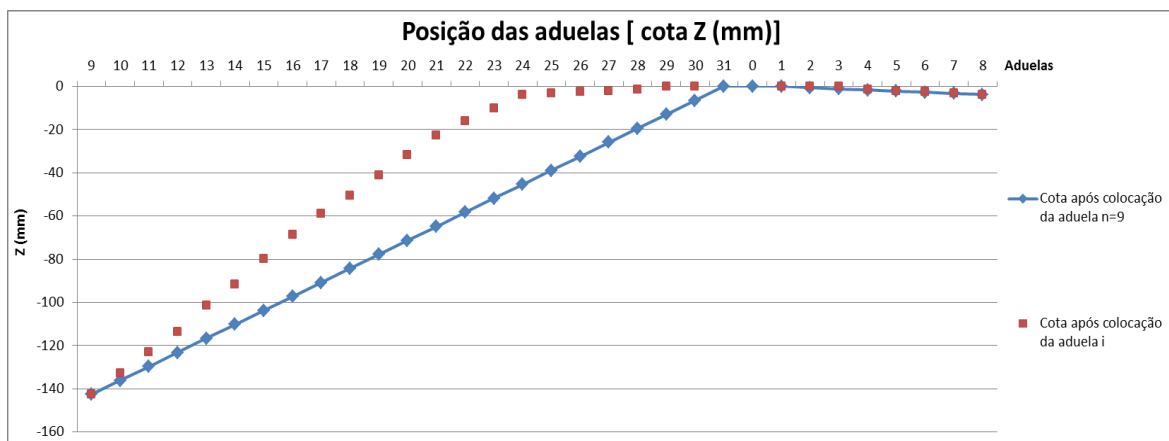


Fig. 5.23. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial

No estudo feito a cota da aduela 24, no final do procedimento, assume o valor de -3.75mm. O valor é aceitável e demonstra que a pré-suspensão das aduelas é eficiente. A pré-suspensão das aduelas do vão seguinte também se mostra eficiente. Como a partir do posicionamento da aduela 23 a deformação da lançadeira não é compensada, no posicionamento desta aduela ocorre uma rotação acentuada do tabuleiro. No final do posicionamento de todas as aduelas a cota da aduela 9 assume o valor de -142.71mm. A cota da aduela 8 assume o valor de -3.75mm.

5.4.4.3. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial e ao sistema OPS

Neste processo construtivo, a pré-suspensão das aduelas e os valores das cotas das aduelas pré-suspensas no final do seu posicionamento, é idêntica ao processo construtivo que pressupõe apenas a pré-suspensão de aduelas. A diferença agora está no posicionamento das restantes aduelas. O processo descrito inicialmente, com pré-suspensão parcial de aduelas, é complementado com o sistema OPS. Como consequência é possível compensar o desvio altimétrico que resulta do posicionamento das restantes aduelas não pré-suspensas.

No final do posicionamento de todas as aduelas, estima-se que estas ficarão posicionadas a uma cota (Z) indicada no gráfico da figura 5.23.

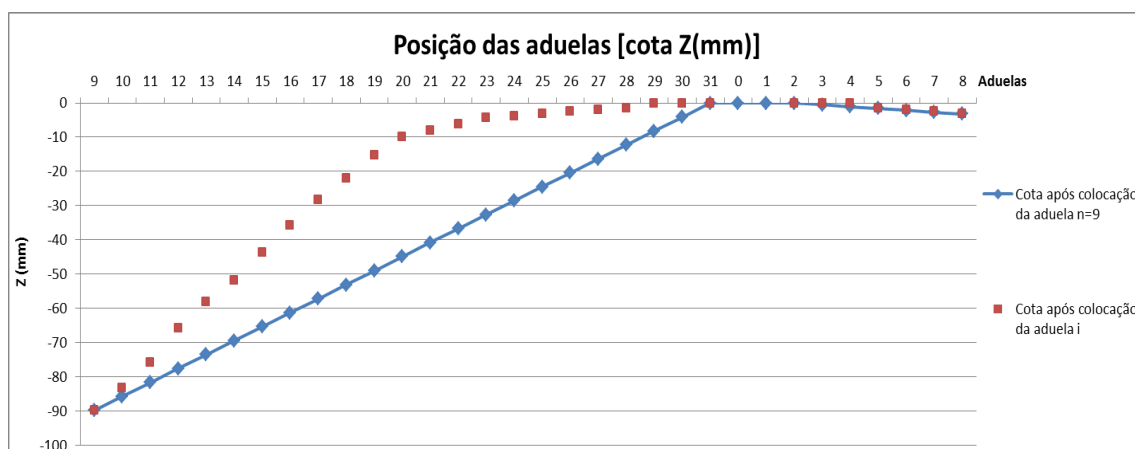


Fig. 5.24. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial e OPS

No caso em estudo, é possível compensar a deformação da lançadeira com recurso ao sistema OPS até ao posicionamento da aduela 20. No posicionamento da aduela 19 ocorre uma rotação acentuada do tabuleiro, pois só é possível compensar parte da deformação. Para corrigir a totalidade seria necessário uma força no atuador superior ao valor limite. Assim, o atuador OPS fica com um curso de 435mm e com uma força de 996ton. No posicionamento das restantes aduelas o valor do OPS mantém-se constante. Apesar de não ser possível a compensação do posicionamento de muitas aduelas, o OPS mostra-se eficaz durante o período de atuação. No final do processo construtivo a aduela 9 assume uma cota com um valor de -89.90mm.

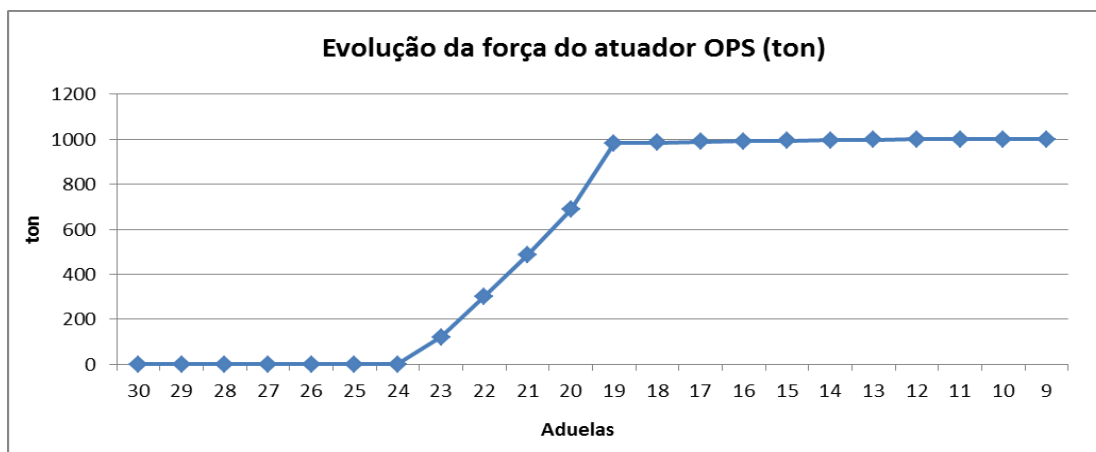


Fig. 5.25. – Evolução da força do atuador OPS ao longo do processo construtivo

5.4.4.4. Simulação do processo construtivo com recurso a pré-suspensão parcial, sistema OPS e ajuste da orientação das primeiras aduelas

No final do processo construtivo com as medidas corretivas pré-suspensão parcial e OPS, a posição do tabuleiro ainda se encontra longe da posição desejada. Um desvio de 89.90mm na zona da junta de betoneagem é de difícil correção. Assim, deve-se adotar mais medidas de correção durante o

posicionamento das aduelas. Como hipóteses poder-se-ia pré-suspender mais aduelas, ajustar a orientação das primeiras aduelas ou até mesmo conjugar as duas medidas.

Como a pré-suspensão de mais aduelas iria tornar o processo construtivo mais demorado será utilizada, como medida corretiva adicional, o ajuste da orientação das primeiras aduelas. Neste procedimento as primeiras aduelas devem ser colocadas de modo a que fiquem com uma determinada inclinação, e assim, no final do processo construtivo as aduelas ficarão com uma cota mais próxima do desejado.

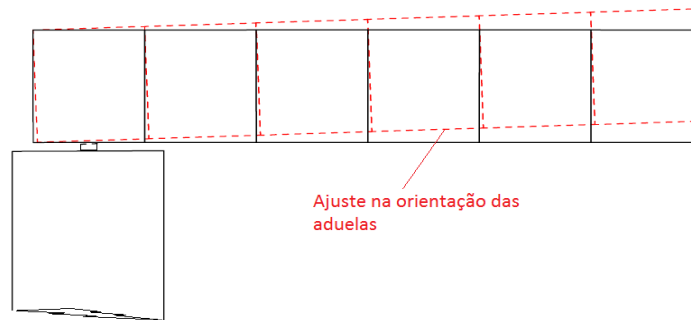


Fig. 5.26. – Ajuste da orientação das primeiras aduelas

Tendo por base os resultados do processo construtivo com pré-suspensão parcial e com OPS, calcula-se a posição a que a ultima aduela pré-suspensa, a aduela 24, teria de ficar aquando do seu posicionamento final. Para que fosse possível chegar ao fim do processo construtivo com valores aceitáveis, a aduela 24 teria de ficar posicionada a uma cota de +18.2mm. Assim, é necessário fazer uma orientação das primeiras aduelas, tendo em conta os desvios que ocorrem durante o processo construtivo, para que a aduela 24 fique com a cota indicada. A colocação das restantes aduelas segue os mesmos passos que o processo descrito em 5.4.4.3.

No final do posicionamento de todas as aduelas, estima-se que estas ficarão posicionadas a uma cota (Z) indicada no gráfico da figura. 5.24.

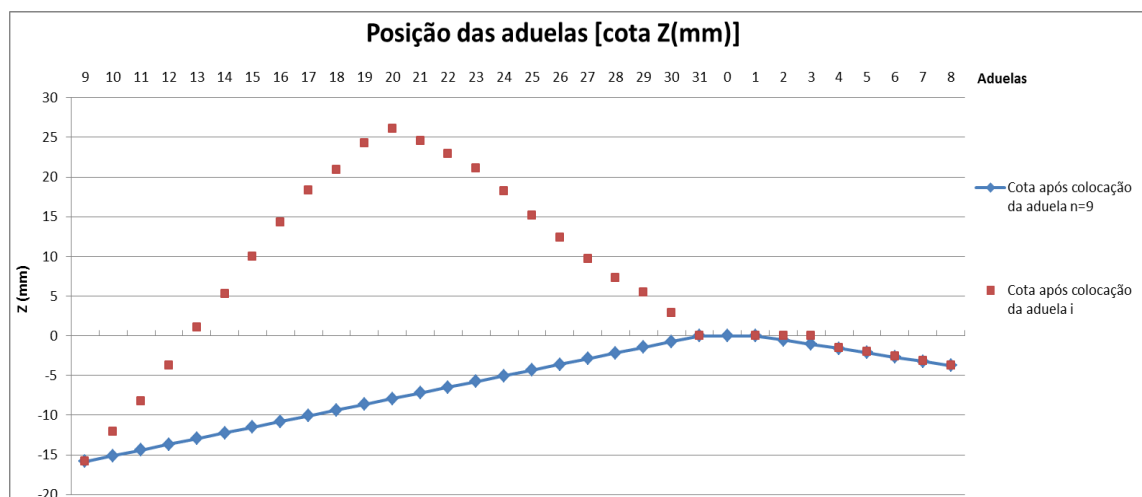


Fig. 5.27. – Posição das aduelas no final do processo construtivo com pré-suspensão parcial, OPS e ajuste da orientação das primeiras aduelas

Embora o procedimento adotado seja adequado, existem alguns aspetos que devem ser vistos com cuidado redobrado. Um deles é a dificuldade no controlo topográfico, pois a posição de cada aduela é específica e terá necessariamente que ser cuidada para que o procedimento de colocação das aduelas resulte. Outro é o facto de que poderá ser necessário considerar forças diferenciais nas barras de suspensão das aduelas para que se consiga obter a geometria do tabuleiro indicada. Estas forças diferenciais nas barras de suspensão resultam em esforços no tabuleiro devidos ao processo construtivo. Para garantir a integridade da colagem com resina epoxi, estes esforços no tabuleiro têm que ser muito controlados.

A cota da aduela 9, no final do processo construtivo, assume o valor de -15.85mm.

No final da colocação de todas as aduelas, um desvio de posição altimétrica do tabuleiro de 15.85mm pode ser corrigido na betonagem da junta de fecho.

5.4.4.5. Comparação dos resultados obtidos

Em comparação dos resultados obtidos verifica-se que, do processo construtivo simples para o processo com o pré-carregamento houve uma redução do desvio em cerca de 63%. Do processo com pré-carregamento para o processo com pré-carregamento e OPS a redução do desvio foi de 36% e deste último para o processo com pré-carregamento, OPS e ajuste da orientação das aduelas iniciais a redução foi de 78%. Na comparação entre o processo construtivo simples e o processo com todas as medidas corretivas, a redução do desvio é de 95%. Na figura 5.25 é possível comparar a posição final das aduelas para cada um dos processos construtivos.

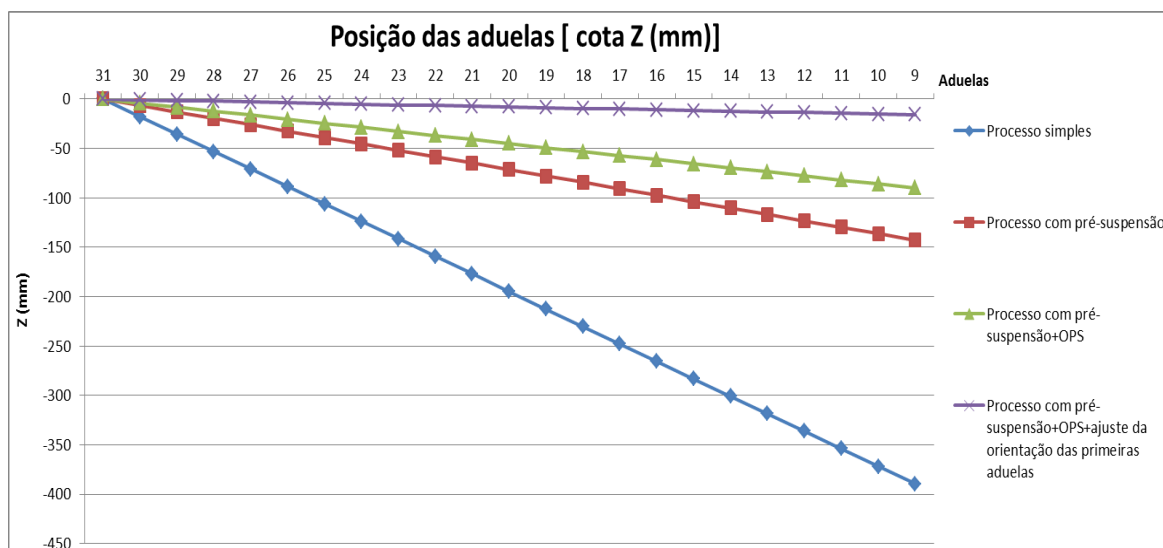


Fig. 5.28. – Comparação dos resultados obtidos

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**6.1. CONCLUSÕES**

Nesta dissertação, foram abordadas as principais particularidades construtivas de pontes construídas com aduelas pré-fabricadas, tendo como principal objetivo o estudo da temática do controlo geométrico do tabuleiro na construção tramo a tramo. Assim, foram apresentados os principais desvios geométricos que podem ocorrer ao longo das diferentes fases construtivas, e as correspondentes medidas preventivas/corretivas. De modo a estudar o desvio ocorrido durante a instalação das aduelas, fez-se uma simulação do processo construtivo de médio e grande vão com duas lançadeiras equipadas com o sistema OPS. Nestes foram incluídos diferentes medidas corretivas avaliando-se a eficiência de cada uma na compensação de um dos mais relevantes desvios geométricos inerente a este método construtivo e que está associado à deformação das lançadeiras ao longo da construção do tabuleiro.

Inicialmente foi abordado o estado da arte da construção de pontes com aduelas pré-fabricadas, onde se descreveram os procedimentos construtivos e equipamentos utilizados nos diferentes métodos construtivos, assim como as principais vantagens e desvantagens de cada um. Assim, foi demonstrada a versatilidade construtiva desta tecnologia.

No que diz respeito às principais particularidades construtivas da construção de tabuleiros com aduelas pré-fabricadas importa realçar alguns aspetos referentes ao método de pré-fabricação, ao sistema de pré-esforço, ao tipo de juntas entre aduelas, o comportamento sísmico e os métodos de análise longitudinal. Relativamente ao método de pré-fabricação, a escolha deste depende, sobretudo, da geometria do tabuleiro a construir e da área disponível para pré-fabricação. Em relação às juntas entre as aduelas, ainda é necessário mais investigação e desenvolvimento na sua conceção e dimensionamento. O tipo de juntas a utilizar, com ou sem resina epoxi, depende do tipo de sistema de pré-esforço longitudinal adotado e da agressividade do meio ambiente do local de construção. No que diz respeito ao sistema de pré-esforço este pode ser interior, exterior ou os dois em simultâneo. A sua escolha depende, sobretudo, do método construtivo adotado, embora também possa ser influenciada pelo dimensionamento a ações sísmicas, estando o sistema de pré-esforço exterior mais indicado para zonas sísmicas. A utilização deste tipo de pontes em zonas sísmicas ainda é limitada, isto porque ainda há incertezas no que diz respeito ao comportamento das juntas na transferência de esforços entre aduelas aquando da ocorrência de um sismo.

A construção tramo a tramo de médio e grande vão com lançadeiras equipadas com sistema OPS é complexa e carece de mão-de-obra qualificada, sendo essencial a compreensão do funcionamento da lançadeira e de todo o processo de montagem das aduelas por parte dos operadores. É imprescindível fazer a análise da interação do equipamento construtivo com a estrutura, uma vez que, no decorrer do

processo construtivo, a deformação da lançadeira cria esforços nas barras de suspensão e tensões nas interfaces das aduelas. É importante fazer uma identificação dos possíveis desvios que podem ocorrer durante as diferentes fases construtivas. Estes desvios podem ser intrínsecos ou eventuais. Os primeiros estão relacionados com a deformação da lançadeira ao longo da fase de colocação das aduelas e os segundos podem surgir quer durante a pré-fabricação das aduelas quer durante a fase de montagem. Todos estes desvios deverão ser compreendidos e estudados de modo a estabelecerem-se medidas preventivas e corretivas, caso contrário, os desvios ocorridos durante as fases construtivas, criam problemas na geometria final do tabuleiro.

O processo de controlo geométrico é complexo e para ser alcançado com rigor, é muito dependente do conhecimento e experiência dos operadores. Um aspeto muito importante a ter em conta antes da pré-fabricação das aduelas é a rigorosa definição do plano de contra-flexas estruturais da superestrutura. É essencial um rigoroso controlo geométrico durante a pré-fabricação, uma vez que é durante este processo que se define a geometria do tabuleiro. Posto isto, é essencial que os eventuais desvios ocorridos na betonagem de uma aduela sejam corrigidos na betonagem da aduela seguinte, uma vez que a margem de correção possível durante a instalação das aduelas é muito reduzida e as ações corretivas são de difícil implementação. No início da fase de instalação das aduelas, o posicionamento da aduela zero é muito importante sendo por isso imprescindível prevenir qualquer desvio na sua correta orientação. Durante a fase de instalação das aduelas, o desvio causado pela deformação da lançadeira deverá ser cuidadosamente analisado e deverão ser implementadas medidas de correção. Na construção de médio vão com a lançadeira LG50 foi compensada com recurso a pré-suspensão parcial e OPS. Estes mostraram-se ser eficazes chegando-se ao fim do processo construtivo com um desvio da posição altimétrica aceitável. De forma análoga, na construção de grande vão com LG90 a deformação da lançadeira foi compensada com recurso pré-suspensão parcial e OPS. Embora estes se tenham revelado eficientes, não se assumem como suficientes e assim, recorreu-se a outra medida corretiva, o ajuste da orientação das primeiras aduelas, obtendo-se assim um desvio da posição altimétrica aceitável.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dada a importância dos esforços causados pela lançadeira na estrutura durante o processo construtivo e a não existência de muita bibliografia sobre a matéria, afigura-se útil fazer um estudo do processo construtivo tendo em conta a rigidez do tabuleiro. Desse modo, será possível estimar o efeito do desvio causado pela deformação da lançadeira, nos esforços das barras de suspensão e nas tensões das interfaces de colagem das aduelas. Permitirá também, fazer a verificação destas tensões e destes esforços ao longo do processo construtivo, tendo em conta os vários procedimentos que se poderão adotar para a compensação da deformação da lançadeira. Em relação à utilização do OPS, será possível estudar qual a melhor altura, durante a instalação das aduelas, para a sua ativação e a força a aplicar para que este seja o mais eficiente possível, sem introduzir esforços excessivos no tabuleiro. Para além disto, ainda se deverá ter em conta o pré-esforço longitudinal de modo a estudar a sua influência na alteração da geometria do tabuleiro.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials - Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Bridges. Washington 1998.
- André, A. M.; Pacheco, P. A.; Adão da Fonseca, A. - Pré-esforço orgânico: Estudos sobre a aplicação de uma nova tecnologia. V *Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto*. (2003).
- André, A. M.; Pacheco, P. A.; Adão da Fonseca, A. - Estudo experimental da aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres autolancáveis. (2004).
- Ariyawardena, T.M.D. - Prestressed concrete with internal or external tendons: Behaviour and analysis. Calgary: University of Calgary, 2000.
- ASBI - Construction Practices Handbook for Concrete Segmental and Cable-Supported Bridges. Texas, E.U.A.: ASBI-American Segmental Bridge Institute, 2008.
- Barker, J. M. - Construction Techniques for Segmental Concrete Bridges. *Long Span Concrete Bridge Conference*. (1980). p. 66-86.
- Benaim, R. - The Design of Prestressed Concrete Bridges: Concepts and Principles. New York: Taylor & Francis, 2008.
- BERD - Ciclo Tipo Para Modelação das Fases Construtivas de Avanço em ROBOT. 2012a.
- BERD - LG90-Machine Work Cycle. 2012b.
- BERD - Caderno de Encargos LEK-Elevação. 2013a.
- BERD - Ponte Laguna-Span by Span Machine Work Cycle. (2013b).
- Carril, T. - Control de Deformaciones en Puentes Sedimentales. *19º Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural* (2006).
- Combault, J. - Precast Concrete Segments for Bridges Fabrication and Assembly - Fundamental Details. *Fib Symposium*. (2004).
- Cooper, T.R.; Murillo, J.A. - Design and Construction of Segmental Bridges in Areas of High Seismicity 2004.
- Fadón, S.; Herrero, J. - Comparación de Valadizos Sucessivos in situ con Voladizos Sucessivos Prefabricados (Viaducto "D'as Coruxas"; Viaducto del Darro). *Harmigón y acero* Vol. 195. (1995). p. 105-118.
- Ferraz, M. Â. C. - Um modelo de análise para o estudo de pontes como estruturas evolutivas. Porto: FEUP, 2001.
- FIGG - <http://www.figgbridge.com>. Março de 2013
- Guerra, A.; André, A. M.; Pacheco, P. A.; Adão da Fonseca, A. - Pré-Esforço Orgânico- Aplicação em Cimbres Autolancáveis-Bases do Projecto Piloto. *Betão Estrutural*. Vol. 2. (2004). p. 1089-1096.
- Hewson, N. R. - Prestressed Concrete Bridges: Design and Construction. Londres: Thomas Telford, 2003.
- Menn, C. - Prestressed Concrete Bridges. Basileia: Birkhauser Verlag, 1990.
- Palmer, A. M. - Fundamentals of launching a precast concrete segmental operation for bridge construction projects. *PCI journal*. Vol. 51. n.º 3 (2006). p. 32.
- Roberts, C. L.; Breen, J. E.; Kreger, M. E. - Measurement Based Revisions for Segmental Bridge Design and Construction Criteria. 1993.

- Rombach, G. - Precast segmental box girder bridges with external prestressing-design and construction. INSA Rennes Technical University, Hamburg-Harburg, Germany. (2002).
- Rombach, G. - Dry Joint Behavior of Hollow Box Girder Segmental Bridges. 2004.
- Sauvageot, G. - Bridge Engineering Handbook. CRC Press, 2000.
- Scible, F.; Megally, S. - Segmental Seismic Tests at the University of California San Diego. 2001.
- Suntharavadi, T.G.; Aravinthan, T. - Overview of External Post-Tensioning in Bridges. Toowoomba, Australia: 2005.
- Tarrataca, T. J. S. - Construção de pontes com aduelas pré-fabricadas. Porto: FEUP, 2009
- Thorburn, N. ; Meyer, M. - Precast Segmental Bridge Construction Lisboa: 2006.
- Trayner, D. - Bridge Construction Methods. 2007.
- Veletzos, M. J. - The Seismic Response of Precast Segmental Bridge Superstructures with Bonded Tendons. San Diego: Universidade da California, , 2007.
- Veletzos, M. J.; Restrepo, J. I. - Development of Seismic Design Guidelines for Segmental Construction. University of California, 2013. SSRP-10/02
- VSL - <http://www.vsl.com>. Março de 2013
- WIECON - <http://www.wiecom.com>. Março de 2013
- Wium, D.; Buyukozturk, O. - Precast Segmental Bridges - Status and Future Directions *Civil Engineering for Practicing and Design Engineers*. Vol. 3. (1984). p. 59 - 79.